



Modélisation numérique de la circulation côtière : application au transport des méduses dans les Pertuis Charentais

Julien Chalumeau

► To cite this version:

Julien Chalumeau. Modélisation numérique de la circulation côtière : application au transport des méduses dans les Pertuis Charentais. Sciences agricoles. Université de La Rochelle, 2014. Français. NNT : 2014LAROS005 . tel-01174991

HAL Id: tel-01174991

<https://theses.hal.science/tel-01174991>

Submitted on 10 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de La Rochelle

Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs)

École doctorale Gay Lussac

UMR7266

**« Modélisation numérique de la circulation côtière:
application au transport des méduses dans les Pertuis Charentais »**

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'université de La Rochelle

Spécialité : Eau, sol, environnement

par

Julien Chalumeau

Composition du jury

M. Cédric BACHER

Rapporteur

M. Eric THIEBAUT

Rapporteur

Mme Christine DUPUY

Examinatrice

Mme Amandine NICOLLE

Examinatrice

M. Jean-Claude MERCIER

Co-directeur de Thèse

M. Mikhaïl KARPYTEV

Co-directeur de Thèse

Université de La Rochelle

Littoral, Environnement et Sociétés (LIENSs)

École doctorale Gay Lussac

UMR7266

**« Modélisation numérique de la circulation côtière:
application au transport des méduses dans les Pertuis Charentais »**

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'université de La Rochelle

Spécialité : Océanographie Physique

par

Julien Chalumeau

Composition du jury

M. Cédric BACHER

Rapporteur

M. Eric THIEBAUT

Rapporteur

Mme Christine DUPUY

Examinatrice

Mme Amandine NICOLLE

Examinatrice

M. Jean-Claude MERCIER

Co-directeur de Thèse

M. Mikhaïl KARPYTEV

Co-directeur de Thèse

AVANT-PROPOS	9
INTRODUCTION GENERALE	11
LE LITTORAL ET SON ECOSYSTEME	11
TRANSPORT DES ORGANISMES EN MILIEU OCEANIQUE ET COTIER	12
COMPORTEMENT DES ESPECES A LEUR MILIEU.....	13
LES MEDUSES	13
PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES	20
MODELISATION	20
QUESTIONNEMENTS SCIENTIFIQUES.....	21
CHAPITRE I. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES PERTUIS CHARENTAIS	25
ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA MAREE ET LE TRANSPORT DE TRACEURS PASSIFS.....	25
1. Généralités sur la marée et définitions.....	25
2. Analyse harmonique	27
3. Type de marée	31
4. Transport de traceurs	32
5. Méthodes de calcul des constantes de temps	33
6. Dispersion et diffusion en milieu marin	39
DEFINITION DE LA ZONE D'ETUDE : LES PERTUIS CHARENTAIS.....	41
1. Présentation géomorphologique	41
2. Contexte Hydrodynamique	42
CONCLUSION	58
CHAPITRE II. DEVELOPPEMENT DU MODELE HYDRODYNAMIQUE TELEMAR-2D.....	61
MODELE HYDRODYNAMIQUE 2D.....	62
1. Stratégie de modélisation.....	62
2. Equations de Navier-Stokes	62
3. Présentation du modèle.....	65
4. Modélisation du transport.....	66
5. Marée en eaux peu profondes.....	67
METHODES ET DONNEES	68
1. Données Bathymétriques.....	68
2. Résolution par éléments finis.....	71
3. Conditions aux limites.....	73
4. Coefficient de frottement	76
5. Diffusion de la vitesse	78
MODELE HYDRODYNAMIQUE 3D	78
ANALYSE HARMONIQUE	78
CONCLUSION	80
CHAPITRE III : MODELISATION DES MAREES DANS LES PERTUIS CHARENTAIS	83
CALIBRATION DU MODELE DE MAREE	83
1. Calibration du modèle à coefficient de frottement uniforme	83
2. Résumé des résultats sur calibration aux marégraphes	90
3. Méthode des lignes d'eaux.....	91
4. Sensibilité de la ligne d'eau au coefficient de frottement.....	97
5. Coefficient de frottement variable.....	101
VALIDATION DU MODELE DE MAREE.....	112
1. Mesures ADCP.....	112

Sommaire

APPLICATIONS DU MODELE DE MAREE	120
1. <i>Cartographie des durées d'émersion</i>	120
2. <i>Temps de renouvellement des Pertuis Charentais</i>	121
DISCUSSION	123
CONCLUSION	126
CHAPITRE IV. EFFET NATATOIRE DES MEDUSES SUR LEUR TRANSPORT ET LEUR DISPERSION DANS LES PERTUIS CHARENTAIS.....	129
INTRODUCTION	129
OBSERVATIONS <i>IN SITU</i>	130
1. <i>Observations des méduses</i>	130
2. <i>Mesures des vitesses des méduses</i>	133
3. <i>Mesures Bouées dérivantes</i>	134
STRATEGIE DE MODELISATION	136
1. <i>Calcul des trajectoires des méduses</i>	136
2. <i>Conditions initiales : scenario de la mise en place des particules</i>	137
RESULTATS DU MODELE	141
1. <i>Bouées dérivantes</i>	141
2. <i>Influence du nombre de flotteurs</i>	141
3. <i>Distribution des particules du modèle</i>	142
4. <i>Comparaison de la distribution des Rhizostoma pulmo et du modèle de particules</i>	152
5. <i>Echouages des particules du modèle</i>	153
6. <i>Indice de dispersion</i>	156
DISCUSSION	159
CONCLUSION :	162
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	165

Liste des illustrations :

Figure 1 : Mécanismes susceptibles d'augmenter les blooms de méduses (Richardson et al., 2009).....	15
Figure 2 : Première page du journal Sud-ouest, 24 juillet 2013.....	16
Figure 3 : Rhizostoma pulmo et son accéléromètre © S.Fossette.....	18
Figure 4 : Cycle de vie de la Rhizostoma pulmo (Fuentes et al., 2011)	19
Figure 5 : Courbe de marée (Simon and Gonella, 2007).Avec La Pleine Mer (PM) et la Basse Mer (BM)	25
Figure 6: Variation la courbe de marée à Brest suivant les phases de la Lune sur 29 jours (Simon and Gonella, 2007).	27
Figure 7: Exemple de spectre de la marée pour le port du Havre. Les abscisses exprimées en nombre de cycles par jour montrent la périodicité de chaque onde. On observe des pics de fréquences bien espacés les uns des autres, représentant les composantes harmoniques (Simon and Gonella, 2007).	28
Figure 8: Répartition des quatre types de marées dans les trois océans (Simon and Gonella, 2007).....	31
Figure 9 : Illustration du temps de résidence, du temps de transit et de l'âge avec une particule qui rentre dans un domaine au temps $t=t_0$ et ressort au temps $t=t_2$ (Determinig, 1998)	34
Figure 10 : Courbe de concentration théorique d'un constituant dans un CSTR et son équation (Plus et al., 2006).....	36
Figure 11 : Exemple de courbes de concentration dans un bassin fictif sous l'influence de la marée en fonction du temps, pour une simulation de 60 jours (en haut) et une autre de 90 jours (en bas). Avec en rouge la valeur de Tf obtenue avec le modèle exponentiel et en bleu la valeur de Tf en prenant l'enveloppe supérieure	37
Figure 12: Carte de la bathymétrie simplifiée du Golfe de Gascogne et des Pertuis Charentais (Bertin, 2005)	41
Figure 13: Courbe de la marée à La Rochelle, pour le mois de janvier 2001. Avec le cycle de vive eaux/morte eaux et la mise en évidence des asymétries diurnes.	43
Figure 14: Spectre de la marée à la Pallice pour l'année 2001	44
Figure 15 : Carte de l'ensemble des marégraphes : (A) Sables d'Olonne, (B) Baleineaux, (C) St Martin de Ré, (D) Pointe de l'Aiguillon, (E) La Pallice, (F) Fort Boyard, (G) Île d'Aix, (H) vasière de Brouage, (I) Le Chapus, (J) La Cotinière, (K) Gatseau, (L) Royan.....	45
Figure 16: Carte des Courants de marée dans les Pertuis Charentais. Résultats de modélisation numérique avec telemac 2D, vent Nul avec un coefficient de marée de 95 (Macur, 1999).	50
Figure 17 : Dates et positions des mesures courantométriques avec ADCP dans les Pertuis Charentais (Stanisiere et al., 2006).....	52
Figure 18 : Moyenne des vitesses de vent de 1984 à 1994 (Rostagno et al., 1999).....	54
Figure 19 : Les différentes régions des Pertuis Charentais utilisées pour le calcul des temps de résidence, avec de gauche à droite : Le Pertuis Breton, Le Pertuis d'Antioche et la Baie de Marennes-Oléron.....	54

Table des figures

Figure 20 : Trajectoire de particules et dispersion du traceur. Exemples de résultats de simulations d'un traceur au bout de dix jours partant de j0 jusqu'à j+10 et sa concentration (Struski, 2005).....	56
Figure 21 : Zone d'influence des masses d'eau selon leur âge – En bleu de J0 à J-2 ; en rose de J-2 à J-5 ; en vert de J-5 à J-10 jours (Struski, 2005)	56
Figure 22 : Carte des données bathymétriques récentes des Pertuis Charentais (Weber et al., 2004). Les intervalles de temps indiqués sur la carte correspondent aux dates d'acquisitions des données. FC: Fosse de Chevarache, FA: Fosse d'Antioche, BID: Domaine Interne [du Pertuis] Breton, AID: Domaine Interne [du Pertuis] d'Antioche, LdB: Longe de Boyard, RdT: Rade des Trousses) (Poirier, 2010).	69
Figure 23 : Emprise des données Litto3D incluant les données topographiques ainsi que les données bathymétriques sur les estrans (Données IGN).	70
Figure 24 : Maillage raffiné de la Baie de Marenne- Oléron	73
Figure 25: Conditions limites du modèle hydrodynamique, avec en marron les frontières solides, en noir la frontière liquide avec hauteur d'eau imposée et en vert les frontières liquides avec débit imposé.	74
Figure 26: Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2. Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	84
Figure 27 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M2 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/\text{Sec}$).....	85
Figure 28: Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4 Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	86
Figure 29 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M4 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/\text{Sec}$).....	87
Figure 30 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6 Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	88
Figure 31 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M6 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/\text{Sec}$).....	89
Figure 32 : Exemples d'images satellites : à gauche, une dalle du satellite SPOT 4 et, à droite, une dalle de la bande TM7 Landsat 7.	93
Figure 33 : (a) de gauche à droite : Image satellite Landsat 7 ; Bande TM5 : Moyen infrarouge en WGS84 ; Classification par critères, en noir : les surfaces inondées, en gris, les terre. Résultat final de l'extraction de la ligne d'eau pour cette image. (b) Superposition de la ligne d'eau extraite et la bande TM5 dans la Baie de Marennes-Oléron ; projection de la ligne d'eau extraite sur le maillage du modèle.....	96
Figure 34. Hauteur d'eau prédite à la Pallice, lignes d'eau observées et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy allant de 50 à 100. Les images satellites ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.....	98

Figure 35 : Hauteur d'eau prédite à la Pallice, lignes d'eau observées et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy allant de 50 à 100 et leur temps de retard. Les images satellites ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.....	100
Figure 36 : Types de zones de frottement prenant en compte : (a) les estrans vaseux de la Baie de Marennes-Oléron, (b) la Baie de Marennes-Oléron, (c) les zones vaseuses des Pertuis Charentais et (d) la zone précédente appliquée sur le maillage.	102
Figure 37 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2 Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	104
Figure 38 : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M2 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$).....	105
Figure 39 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4 Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	106
Figure 40 : : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M4 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$).....	107
Figure 41 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6 Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.	108
Figure 42 : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M6 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$).....	109
Figure 43 : Hauteur d'eau prédite à la Pallice, ligne d'eau observée et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy variable. Les images satellite ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.....	111
Figure 44 : Positions des mesures courantométriques avec ADCP dans les Pertuis Charentais (Stanisiere et al., 2006).....	113
Figure 45: Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Est...	114
Figure 46 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Ouest	114
Figure 47 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chapus.....	115
Figure 48 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées à la pointe de Gatseau	115
Figure 49 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées dans la fosse d'Enet	116
Figure 50 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées à la pointe de Sablanceaux.....	116
Figure 51 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées sur le plateau d'Angoulin	117

Table des figures

Figure 52 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Est du banc de Lamouroux	117
Figure 53 : Composantes U, V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Ouest du banc de Lamouroux	118
Figure 54 : Durées d'une émigration (en heures) de la Baie de Marennes-Oléron pour un coefficient de marée 75.	121
Figure 55 : Limite retenue des Pertuis Breton, d'Antioche et de la Baie de Marennes-Oléron pour le calcul des temps de renouvellement.....	122
Figure 56 : Distribution spatiale et abondance des méduses Rhizostoma pulmo dans le Pertuis Breton et le Pertuis d'Antioche, estimées lors d'un survol aérien le 22 août 2011. Les zones grisées représentent les agrégations de méduses observées en 1983(modifiée de Husson & Fay 1983,)......	131
Figure 57: Histogrammes circulaires avec en haut les directions des courants et-en bas les directions de nage de méduses Rhizostoma pulmo mesurées le long de 19 transects et effectués entre le 21 Août et 1er Septembre 2011. Marée descendante, n = 7 transects, 10 bouées et 298 méduses, marée basse, n = 4 transects, 6 bouées et 158 méduses, et marée haute, n = 8 transects, 16 bouées et 388 méduses, dans le Pertuis Breton. Dans chaque figure, la direction moyenne est représentée par une flèche, dont la longueur correspond à l'intensité (Fossette et al. in prep)	133
Figure 58 : Bouée dérivante et sa voile avant immersion.	135
Figure 59 : Positions initiales des lâchers de bouées et résumé des caractéristiques météorologique.....	135
Figure 60 : Domaine du modèle et sa bathymétrie. Les points sur la gauche indiquent les positions du lâcher des particules dans le pertuis Breton au sud de la côte vendéenne	137
Figure 61 : Exemple d'une grille de résultats de densité nulle.	139
Figure 62 : Représentation schématique d'un flotteur arrivant près des côtes pour s'échouer. Avec en rouge la hauteur d'eau minimale de 1mètre considérant le flotteur comme échouer dans le modèle.....	140
Figure 63 : Trajectoire des bouées dérivantes et trajectoires des flotteurs modélisés pour la même période de temps.....	141
Figure 64 : Au-dessus : La distribution spatiale de 1000 particules après 1 mois de simulation, Dessous : La distribution spatiale de 120 000 particules après 1 mois de simulation.....	142
Figure 65 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton sans vent et sans nage (modèle 1). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	145
Figure 66 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 4m/s et sans nage (modèle 3). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	146
Figure 67 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis breton avec un vent Ouest de 10 m/s et sans nage (modèle 5). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	147

Table des figures

Figure 68 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton sans vent et avec nage (modèle 2). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	149
Figure 69 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 4m/set et avec nage (modèle 4). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	150
Figure 70 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 10m/s et avec nage (modèle 6). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.....	151
Figure 71 : Distribution spatiale et abondance des méduses <i>Rhizostoma pulmo</i> dans les Pertuis Charentais, estimées lors d'un survol aérien le 22 aout 2012. Les zones grisées représentent les agrégations de méduses observées entre avril et septembre 1983(data modifiée de Husson & Fay 1983)	152
Figure 72 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, sans vent, avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice.....	154
Figure 73 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, avec un vent de 4 m.s ⁻¹ , avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice.....	154
Figure 74 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, avec un vent de 10 m.s ⁻¹ , avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice.....	155
Figure 75 : Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations sans vent.	157
Figure 76: Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations avec vent moyen.....	157
Figure 77: Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations avec vent fort.....	158

Liste des tableaux :

Tableau 1: Composantes harmoniques principales de la marée ; Le coefficient de la dernière colonne représente le ratio d'amplitude de l'Onde par rapport à M2 (Wright and Team, 1999)	29
<i>Tableau 2 : Principales composantes non-linéaires (Lefevre, 2000)</i>	30
Tableau 3: Résultats de l'analyse harmonique des 20 ondes principales de marées à la Pallice pour l'année 2001 en temps universelle plus une heure.	44
Tableau 4 : Durée d'enregistrement des marégraphes et leur source. Les données marquées Chalumeau correspondent aux mesures effectués au cours de cette thèse	47
Tableau 5 : Amplitudes (en mètres) et phases (en degrés) des ondes principales de marée observées dans les Pertuis Charentais en temps universel plus une heure	48
Tableau 6 : moyennes de Z_0 (en mm), C_d et C (en $m^{1/2}.sec^{-1}$) pour différents types de fond (Soulsby, 1983)	77
Tableau 7 : Durée d'observation minimale nécessaire pour extraire le constituant (Foreman, 1977).	80
Tableau 8 : Amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2	84
Tableau 9 : Amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4	86
Tableau 10 : Amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6	88
Tableau 11 : Ecart moyen absolu des Ondes M2, M4 et M6 en Amplitudes (cm) et phases($^{\circ}$) aux différents marégraphes	91
Tableau 12 : Résumé des images satellites utilisées dans cette étude	94
Tableau 13 : Résumé des amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et modélisées pour deux cas de frottement variable appliqué sur le maillage.	103
Tableau 14 : Ecart moyen absolu des ondes M2, M4 et M6 en Amplitudes (cm) et phases($^{\circ}$) aux différents marégraphes	110
Tableau 15 : Temps de renouvellement avec un vent moyen, selon la direction du vent. Comparé au temps de renouvellement des Pertuis Charentais par Mars 2D (Stanisiere et al., 2008).	122
Tableau 16 :Résumé des transects menés lors de la campagne d'août 2011 (Fossette et al. in prep) comprenant le numéro de transect, la date, l'heure de début des observations, le nombre de méduses observées, la direction de nage des méduses et la direction du courant.	132
Tableau 17 : Moyenne, médiane et le maximum de l'amplitude de la Vitesse des vents observés sur trois mois	138

Avant-propos

Le terme « océanographie », ou science de la mer, rassemble un nombre impressionnant de corps de métier. Cette science regroupe en son sein l'ensemble des études relatives à la mer, comprenant de nombreuses disciplines. Parmi elles, l'océanographie physique correspond aux travaux menés sur les processus physiques qui affectent les océans, comme les courants par exemple. L'océanographie biologique, quant à elle, a pour objet d'étude les êtres vivants peuplant l'océan et leurs interactions et évolutions avec le milieu physique. Le rapprochement de deux domaines de recherche ouvre une nouvelle dimension en confrontant deux visions, souvent différentes mais pas incompatibles, d'une même problématique. La capacité du scientifique à pouvoir répondre aux problématiques offertes par ce nouveau point de vue, avec les outils dont il dispose tout en ayant ses propres interrogations, est à la base de ce travail de doctorat.

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre du laboratoire Littoral ENvironnement et Sociétés. LIENSs est une unité mixte de recherche qui incorpore différents domaines scientifiques. L'ensemble de ses domaines est divisé en six équipes de recherche ayant comme thématique commune l'étude du littoral. La thèse s'est déroulée au sein de l'équipe Dynamique Physique du Littoral (DPL), qui a pour objectif l'étude des phénomènes physiques du littoral en collaboration avec les chercheurs de l'équipe DYnamique Fonctionnelle des Ecosystèmes côtiers Anthropisés (DYFEA). Au début de la thèse j'ai pu participer aux travaux de recherche menés au sein du projet ANR VASIREMI¹. J'ai aperçu nombre de sujets scientifiques qui m'étaient inconnus et côtoyé un peu plus chaque jour de nouveaux aspects de la recherche, comprenant des corps de recherche du littoral variés. Je me suis ainsi intéressé aux différents aspects du transport des méduses, de leur agrégation en « blooms » et de leur dispersion dans les Pertuis Charentais. Toutes ces questions ont formé le sujet principal de cette thèse. La rencontre avec les chercheurs qui ont étudié les méduses dans le cadre du projet JellyTrack² m'a permis de participer à une étude interdisciplinaire sur le comportement des méduses dans les Pertuis Charentais. Le travail ici présenté, est le fruit de problématiques ouvertes en commun. L'interdisciplinarité est née en appliquant ces outils au domaine biologique et en le couplant au suivi des espèces.

Cette thèse se divise en deux grandes parties.

La première partie se consacre sur la présentation du modèle hydrodynamique mis en place au cours de cette thèse. Ce modèle a été construit pour préciser les chemins du transport de la matière biologique sur la vasière de Brouage observés par les biologistes de LIENSs. Les images satellites permettent de visualiser la position de la ligne d'eau, la frontière entre l'eau et la terre, sur la vasière de Brouage ont été utilisées pour contraindre le modèle hydrodynamique. Cette nouvelle méthode de calibration de modèles hydrodynamiques dans

¹ Rôle trophique des biofilms microbiens dans les vasières intertidales : <http://vasiremi.univ-lr.fr>

² Connectivity of jellyfish populations: "Jellytrack". <http://www.jellytrack.co.uk/>

des zones intertidales a pu être mise en œuvre grâce à la collaboration avec les chercheurs de l'équipe Approche Géographique : Iles, Littoraux, Environnement (AGILE).

La deuxième partie est née d'un rapprochement scientifique avec les chercheurs, S. Fossette et G. Hays de l'université de Swansea (Pays de Galles) durant ce doctorat. Leurs travaux menés *in situ* dans les Pertuis Charentais en 2011 sur la méduse *Rhizostoma pulmo* ont soulevé de nombreuses questions, en particulier sur la formation des blooms de méduses durant la période estivale et sur la capacité de cette espèce planctonique à pouvoir nager. Ces questions ont été abordées lors de cette deuxième partie de thèse et résolues grâce au modèle hydrodynamique.

Introduction Générale

Le littoral et son écosystème

Le littoral représente l'interface entre mer et continent. C'est un milieu dynamique et fragile soumis à un hydrodynamisme complexe. Sur le plan physique, les conséquences de phénomènes naturels graves, voire dramatiques sont observées à de nombreuses reprises dans le monde, avec des événements perceptibles à différentes échelles temporelles comme la remontée du niveau marin à l'échelle globale (Wöppelmann et al., 2009), les tsunamis (Levin et al., 2008) et les surcotes (Bertin et al., 2012), liées à l'augmentation en fréquence et en intensité des tempêtes (Lozano and Swail, 2002). Ces phénomènes météorologiques et climatiques augmentent ainsi le risque d'érosion de la bande littorale ce qui n'est pas sans conséquence sur les écosystèmes côtiers.

En prenant en compte le fait que 50 % de l'humanité vit dans une bande côtière de 20 km de large (Cohen, 1997; Post et al., 1996; Small and Nicholls, 2003), on comprend que les enjeux d'une bonne compréhension de la zone littorale sont cruciaux. Cette croissance démographique est naturellement accompagnée d'activités économiques, industrielles et touristiques complexifiant et fragilisant les façades littorales en induisant de fortes pressions anthropiques. L'immigration humaine vers le littoral est, par ailleurs, une tendance mondiale en constante augmentation, les estimations démographiques à l'horizon 2025 faisant état d'une concentration de 70 à 75 % de la population sur le littoral (Haq et al., 1998; Post et al., 1996).

D'un point de vue écologique, en raison de leur caractère d'interface entre terre et mer, les zones côtières se composent de nombreux écosystèmes complexes et interconnectés au sein desquels vivent ou transitent de nombreuses espèces. Les grands écosystèmes qui les composent sont principalement les mangroves, les estuaires, les marais salés, les récifs coralliens, les estrans, les lagunes, les fjords, les herbiers, etc. Or, ces milieux sont souvent très productifs (Nixon et al., 1986) et présentent des fonctions de nourricerie pour de nombreuses espèces (Beck et al., 2003, 2001). Ils sont eux aussi touchés par les activités anthropiques croissantes (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), qui influencent négativement leur fonctionnement et leur durabilité. La fragmentation des habitats perturbe notamment les équilibres écologiques qui régissent ces écosystèmes. La multiplicité des écosystèmes littoraux existants, relatifs à cette connectivité terre-mer, se traduit par la présence de « hotspots » de biodiversité décrits par Myers (2000). Les écosystèmes marins côtiers représentent, de ce fait, un enjeu majeur au cœur de zones littorales complexes. Dans le contexte contemporain, le littoral apparaît donc comme une zone particulièrement sensible, subissant une anthropisation en constante augmentation, justifiant son rôle central dans les problématiques environnementales et scientifiques actuelles.

Transport des organismes en milieu océanique et côtier

Les mers et les océans sont peuplés de nombreuses espèces qui subissent les contraintes imposées par le milieu marin. Deux catégories d'organismes marins se distinguent, ceux vivant en pleine mer ou domaine pélagique, constituant le pélagos et ceux vivant sur le fond ou domaine benthique, constituant le benthos. Toutes les espèces ont la nécessité de se déplacer dans leur milieu afin de satisfaire leurs besoins primaires nécessaires à leur survie et leur pérennité : respirer et se nourrir. Leur capacité à se mouvoir se traduit par une mobilité plus ou moins importante selon l'espèce et un gradient allant de formes de vie vagile à fixé. Les organismes se divisent en deux catégories selon leurs comportements face aux courants (Bougis, 1967) :

- Le plancton : ces organismes dépendent des courants et sont transportés de manière passive par les masses d'eaux.
- Le necton : ces organismes doivent se propulser dans le milieu aquatique et se déplacent indépendamment des courants.

Par exemple, de nombreux groupes d'espèces comme les mollusques ou les échinodermes vivent sur les fonds marins et sont peu mobiles. Les larves planctoniques, quant à elles, se laissent porter passivement par les courants à la différence des poissons qui se meuvent activement dans la colonne d'eau. Chez les espèces fixées, il existe des formes juvéniles qui sont mobiles et dispersées par les courants. Par ailleurs, les gamètes sont aussi dispersés dans le milieu marin et donc dépendants des courants, chez les espèces fixées comme chez les espèces mobiles.

Il existe de nombreux facteurs à petites et moyennes échelles responsables de la dispersion et du transport de ces espèces. Afin de comprendre le milieu côtier, il est nécessaire de comprendre de quelle manière et avec quelle intensité les phénomènes physiques influencent ces mouvements. Les écosystèmes littoraux sont particulièrement soumis à des phénomènes abiotiques tels que le vent, la houle et la marée qui induisent de nombreuses réponses physiologiques, morphologiques et comportementales de la part des espèces peuplant ces habitats.

Le transport des espèces marines par les courants est donc une étape clé pour la compréhension de ces populations côtières, puisqu'il façonne en grande partie leur distribution. Cependant, il est quasiment impossible de suivre le devenir de certaines espèces en marquant individuellement leurs populations *in situ*, représentant un nombre trop élevé d'individus dans l'océan.

Comportement des espèces à leur milieu

Nageant ou volant, les organismes sont confrontés aux mêmes problèmes lorsqu'ils doivent se mouvoir dans leur milieu : l'incidence des vents et des courants marins sur leurs trajectoires. Pour beaucoup d'organismes, les vitesses des courants sont du même ordre de grandeur ou supérieures à leur vitesse de déplacement. L'impact des courants de dérive est particulièrement important sur le cycle de vie des espèces. Ainsi, si un animal est déporté de sa trajectoire initiale à cause d'un courant de dérive, il devra compenser cette dérive par un effort physique pour contrer ce courant et atteindre sa destination. Cela aura pour effet une augmentation du coût énergétique de transport. Les effets de dérive sont des phénomènes communs à de nombreuses espèces migratoires, comme par exemple l'impact du vent sur les libellules (Wikelski et al., 2006), les papillons de nuit (Chapman et al., 2008) et les oiseaux (Thorup et al., 2006) mais aussi les courants océaniques sur les tortues (Sale and Luschi, 2009). Les courants de dérive peuvent aussi être bénéfiques et faciliter la dispersion des larves et des juvéniles, améliorant les chances de survie (Shillinger et al., 2012), affectant la connectivité des populations (Do Nascimento 2013) ou affectant le renouvellement, la persistance démographique des populations et leur dynamique dans une zone donnée (Shanks and Eckert, 2005).

Face aux inconvénients et avantages liés aux phénomènes de dérive par les courants, les animaux ont développé différentes stratégies pour s'adapter (Chapman et al., 2008). Les espèces qui se déplacent rapidement peuvent ajuster leur direction de nage et quelquefois leur vitesse afin de compenser les courants qui les dévient de leurs trajectoires (Chevaillier et al., 2014). À l'inverse, les espèces qui se déplacent lentement, comme les larves, les insectes ou les petits crustacés, ne peuvent pas lutter physiquement contre un fort courant et doivent alors adopter d'autres stratégies comportementales pour contrer l'effet des courants. Par exemple, certaines espèces de poissons ajustent leur période de reproduction pour profiter de courants favorables à la dispersion de leurs larves (Shanks and Eckert, 2005). Les larves de poissons, ainsi que certains copépodes, crustacés décapodes et cténophores influencent leurs trajectoires en modifiant leur position verticale dans la colonne d'eau pour exploiter des courants plus favorables. Les méduses font partie des espèces pélagiques ayant des aptitudes limitées à la nage.

Les méduses

D'un point de vue écologique, les méduses appartiennent au compartiment planctonique. Mais, contrairement au plancton qui ne peut pas nager à contre-courant et dont les déplacements sont totalement soumis aux mouvements des masses d'eau, les méduses sont capables de se déplacer grâce aux muscles de leur ombrelle.

Les méduses appartiennent à l'embranchement des cnidaires qui se divise en trois classes: les *Scyphozoaires*, les *Hydrozoaires* et les *Cubozoaires*. Récemment, elles sont

devenues un centre d'intérêt majeur aussi bien dans les domaines écologique qu'économique. Les agrégations de méduses, appelées « Blooms », peuvent compter d'une centaine à plusieurs millions d'individus qui se rassemblent en particulier dans les estuaires et les zones côtières (Lilley et al. 2009). Ces proliférations de méduses ne sont pas un phénomène récent, mais il semblerait que la fréquence et l'amplitude de ce phénomène aient augmenté au cours des dernières décennies, et ce sur l'ensemble du globe (Brotz et al. 2012). Les proliférations et les invasions des méduses sont des phénomènes mondiaux (Richardson et al., 2009). Les raisons avancées pour expliquer ce phénomène sont d'ordre anthropique et climatique (Figure 1). Ainsi, l'eutrophisation, la surpêche ou le réchauffement climatique peuvent être bénéfiques aux populations de méduses (Purcell, 2012). Dans certaines régions, les méduses causent des problèmes dans les écosystèmes. De fait, elles peuvent devenir compétitrices de prédateurs dominants, entraînant une réorganisation du réseau trophique de l'écosystème (Riisgård and Madsen, 2011). Parmi les transformations écologiques majeures actuelles, les blooms ont été répertoriés comme étant un problème important du point de vue socio-économique puisqu'ils affectent le renouvellement démographique des populations de poissons en se nourrissant des larves et provoquent des pertes financières au niveau de l'industrie de la pêche. C'est en Asie du nord-est (Chine, Taïwan, Japon, Corée du Nord et du Sud) qu'ils posent le plus problème. Selon des estimations récentes, ils coûteraient annuellement plus de 200 millions d'euros au secteur sud-coréen de la pêche (Nishikawa et al., 2008). Ils ont également des conséquences sur le tourisme littoral avec des proliférations de méduses observées sur différentes côtes à travers le monde. Les bancs de méduses peuvent envahir les eaux de baignade ou s'échouer sur les rivages provoquant des dommages économiques. Par exemple, en octobre 2013, suite à l'entrée de méduses dans les canalisations d'eau de refroidissement, le réacteur principal d'une centrale nucléaire suédoise a dû être arrêté pendant 3 jours³.

³ Les méduses, l'invasion qui vient : www.slate.fr

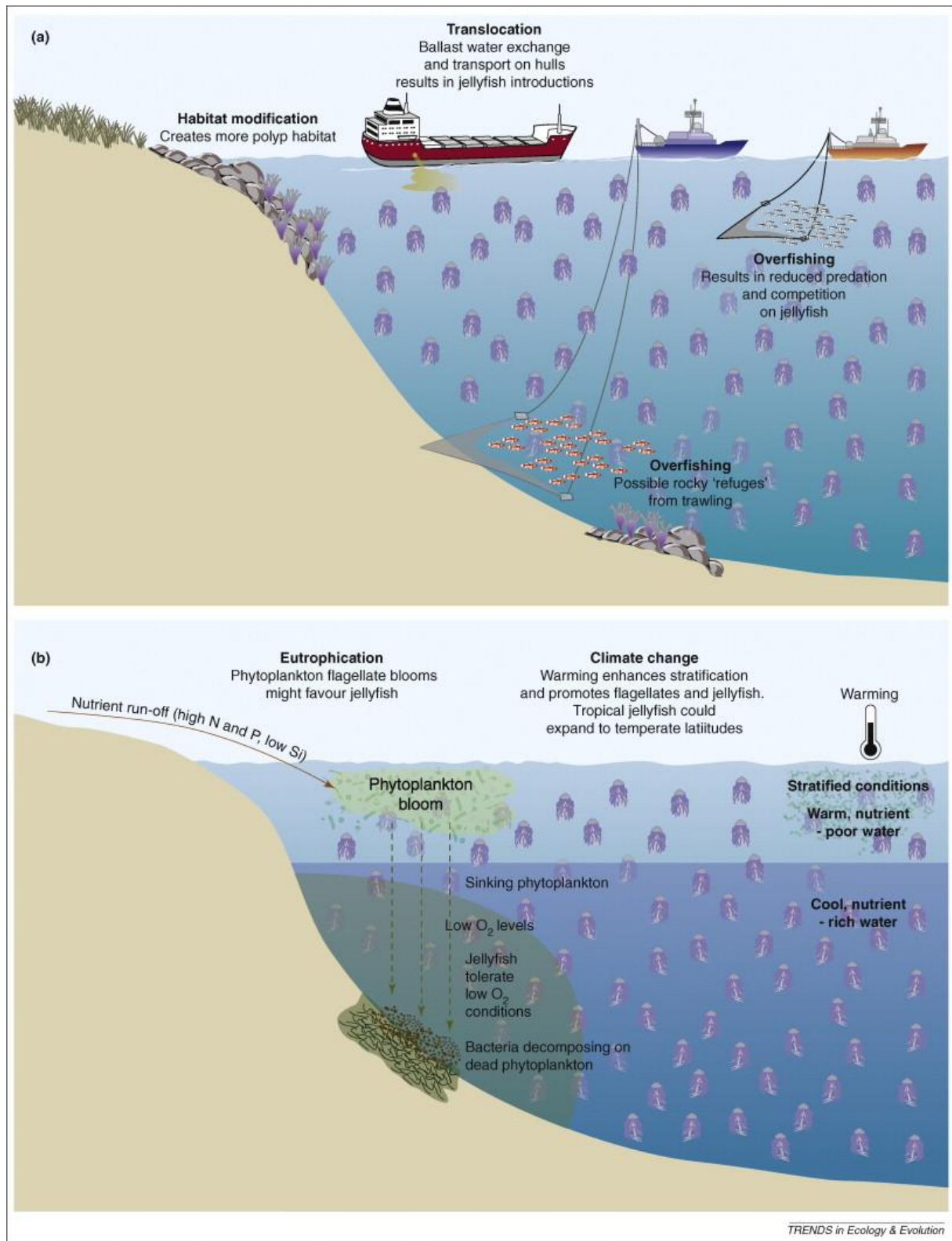


Figure 1 : Mécanismes susceptibles d'augmenter les blooms de méduses (Richardson et al., 2009).

(a) impacts de la modification de l'habitat, de la translocation, et de la surpêche sur les blooms de méduses.

(b) impacts de l'eutrophisation et du changement climatique sur les pullulations de méduses.

En France

En France, on observe des méduses sur l'ensemble des zones littorales. Elles sont surtout localisées sur la côte méditerranéenne, mais aussi en mer du Nord, et sur le littoral atlantique. L'une des proliférations de méduses les plus médiatisées concerne l'espèce urticante *Pelagia noctiluca* (Forsskål and Niebuhr, 1775) qui est étudiée en mer Méditerranée. Ces méduses impactent elles aussi les zones de pêche et les activités touristiques. Elles prolifèrent de manière cyclique durant l'été, mais depuis quelques années, les blooms sont de plus en plus nombreux et se présentent tous les ans voire même l'hiver.

Moins connue du grand public, l'espèce *Rhizostoma pulmo* (Linnaeus, 1758) de la classe des Scyphozoa vit en Atlantique. Leurs blooms sont répartis sur toutes les côtes d'Europe y compris les côtes françaises. Leur première observation remonte en 1977, puis 1978 et 1982 avec 20 tonnes ramassées par un pêcheur (Donnard, 2012). Comme d'autres méduses le nombre de blooms de *Rhizostoma* depuis la fin du XXème siècle est en augmentation. La grande *Rhizostoma* de Cuvier (*Rhizostoma pulmo*), de la classe des Scyphozoa, est une espèce non-urticante très fréquente sur les côtes Charentaises, notamment vers la Tranche-sur-Mer et au nord de l'Île d'Aix, en particulier durant les périodes estivales. On les retrouve au large de la Rochelle où elles représentent de manière localisée de la nourriture pour les tortues luths comme en atteste la Figure 2. Les agrégations durent au minimum 5 mois aux mêmes endroits, année après année (Husson and Fay, 1983).



Figure 2 : Première page du journal Sud-ouest, 24 juillet 2013

La Rochelle fait partie des régions avec une forte diversité des écosystèmes, notamment littorale, ce qui fait des Pertuis Charentais un site d'étude privilégiée. Du reste *Rhizostoma* est étudiée dans les Pertuis Charentais. Des chercheurs de l'Université de

Swansea (Pays de Galles) ont mené, lors de l'été 2011, des suivis de ces méduses à La Tranche sur Mer durant une quinzaine de jours afin d'essayer de mieux comprendre le comportement et les déplacements de ces méduses.

Rhizostoma pulmo

Depuis le XVIII^e siècle, les zoologistes français portent un grand intérêt aux concentrations importantes que cette espèce forme dans les Pertuis pendant les mois d'été. René-Antoine Ferchault de Réaumur, personnage illustre des naturalistes rochelais, présentait dès 1710 une étude sur les méduses à l'Académie des sciences où il faisait une description détaillée du *Rhizostoma pulmo* qu'il proposait de nommer « gelée de mer » (Husson and Fay, 1983). Les caractéristiques de cette méduse, qui peut atteindre un mètre de diamètre et qui reste surtout en surface, la rendent facile à observer en mer. La Figure 3 montre une de ces méduses dans son milieu naturel au large de la Rochelle lors de la campagne de 2011 par les chercheurs de Swansea. Sa position systématique dans le règne animal est la suivante :

- Cnidaria [Embranchement]
- Scyphozoa [Classe]
- Discomedusae [Sous-classe]
- Rhizostomeae [Ordre]
- Daktyliophorae [Sous-ordre]
- Rhizostomatidae [Famille]
- Rhizostoma [Genre]
- *Rhizostoma pulmo* (Macri, 1778) [Espèce]



Figure 3 : *Rhizostoma pulmo* et son accéléromètre © S.Fossette

La *Rhizostoma octopus* est le nom donné anciennement à *Rhizostoma pulmo*. Ce changement de nom semble venir du problème de classification des Rhizostomidés qui n'était pas encore au point, les différents auteurs ne s'accordant pas sur le problème des espèces et variétés du genre *Rhizostoma* (Husson and Fay, 1983). En effet, selon certains scientifiques, *Rhizostoma pulmo* est souvent confondue avec *Rhizostoma octopus* (Linnaeus, 1788), qui est la forme atlantique, plus petite, de cette méduse. Les deux espèces sont pointées comme différentes dans certains ouvrages du fait de leur éloignement géographique (Yahia et al., 2003). De manière générale, les deux espèces sont en fait la même et les deux appellations sont reconnues comme synonymes⁴.

Peu d'informations sur le cycle de vie de *Rhizostoma* existent (Johnson et al., 2001). Les seules descriptions de leur cycle de vie (Figure 4) ont été faites en laboratoire et n'ont pas été observées dans la nature (Fuentes et al., 2011; Holst et al., 2007).

Cependant très peu d'informations scientifiques sont disponibles sur cette espèce en Atlantique et de nombreuses questions restent en suspens. Par exemple ses agrégations saisonnières demeurent inexplicées : sont-elles liées aux courants marins ? Les Pertuis seraient-ils une zone où le plancton s'accumule ? Ou, au contraire, les *Rhizostoma* seraient-elles capables de se déplacer d'elles-mêmes vers certaines zones à certaines époques de l'année ?

Le phénomène de prolifération de méduses est donc un problème très sérieux auquel l'homme va devoir trouver une réponse rapide. Mais nous ne disposons que de peu de suivis qui permettraient d'avoir des données comparatives nécessaires pour comprendre les phénomènes de blooms.

⁴ World Register of Marine Species : www.marinespecies.org

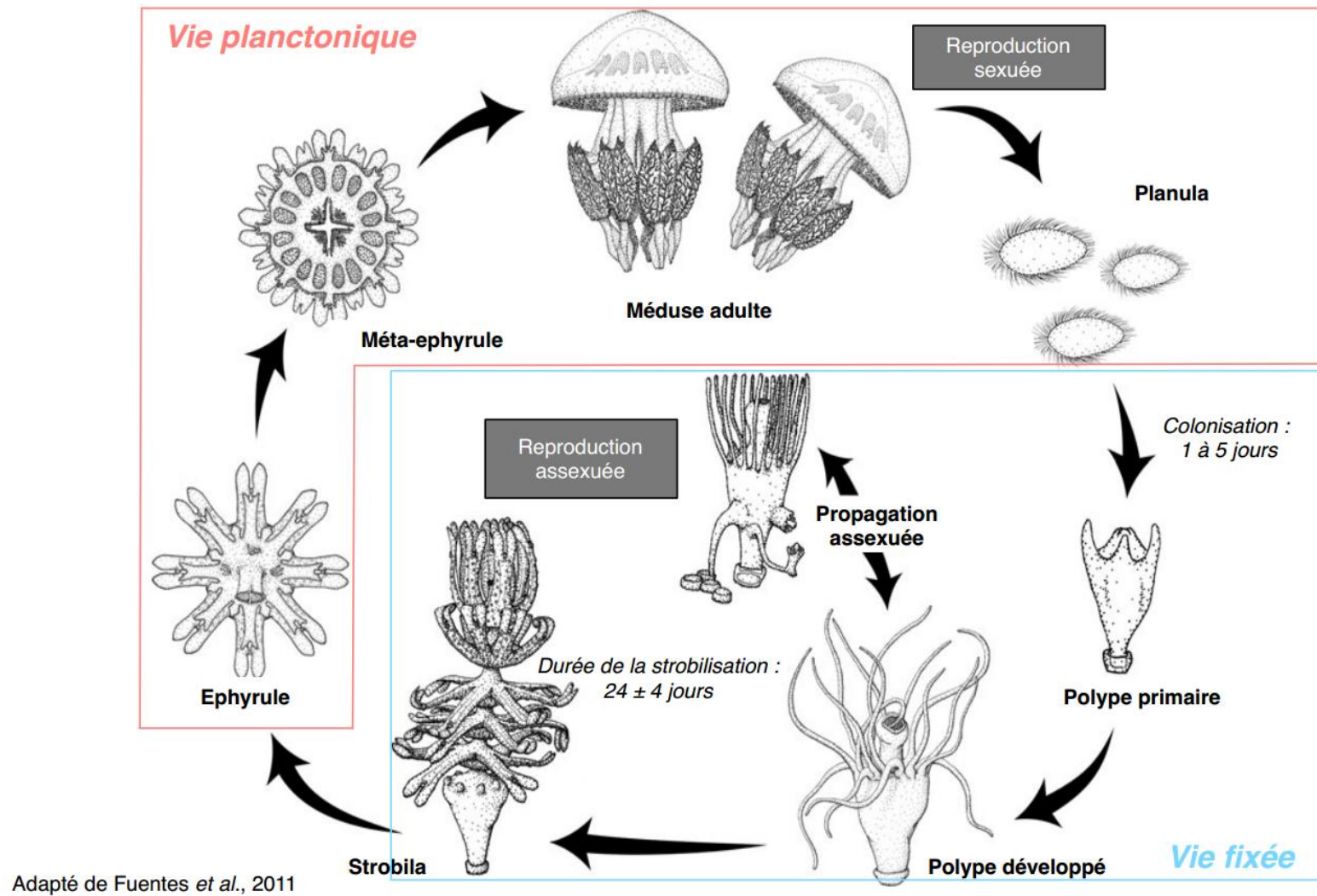


Figure 4 : Cycle de vie de la *Rhizostoma pulmo* (Fuentes *et al.*, 2011)

Problématiques scientifiques

Les courants et les vents influencent le transport des méduses en dispersant leurs populations (Houghton et al., 2007; Johnson et al., 2001). La combinaison de courants dérivants couplés au comportement natatoire des méduses semble être la cause des blooms (Graham et al., 2001). Cependant, le facteur prédominant dans la formation et la pérennité des blooms de méduses n'est pas élucidé. Les méduses Scyphozoaires peuvent nager à une vitesse de quelques centimètres par seconde (Matanoski et al., 2004), ce qui va influencer leur distribution horizontale. Les agrégations jouent un rôle dominant dans la biologie et l'écologie des méduses puisqu'ils facilitent leur reproduction et les aide à lutter contre les prédateurs (Graham et al., 2001). Les mouvements de nage horizontaux des méduses suggèrent un comportement d'adaptation contre les facteurs abiotiques tels que le courant, la houle et le vent de surface, qui menacent la stabilité de leur agrégation. Ainsi, des études suggèrent que les méduses changent leur direction de nage afin de lutter contre la direction du courant (Albert, 2011). Cependant, dans la plupart de ces études, les courants n'étaient pas mesurés *in situ*, ils étaient simplement déduits, ce qui rend les interprétations très hypothétiques.

Il existe aussi très peu de séries de données sur les blooms de méduses sur le long terme. Ceci souligne le besoin de développer la recherche sur le zooplancton gélatineux (Purcell, 2012). Il est encore très difficile de prédire et déterminer l'apparition des blooms.

Modélisation

La modélisation numérique est aujourd'hui un outil essentiel dans la compréhension de phénomènes physiques complexes, en particulier le comportement hydrodynamique des océans. Le développement des ordinateurs ces dernières années a permis une avancée dans la simulation de la circulation océanique avec des résultats essentiels concernant les courants, les températures, les vagues ou la salinité de la mer avec de plus en plus de précision. Le développement de la modélisation numérique est une des plus grandes avancées scientifiques de la fin du siècle dernier, nous permettant d'améliorer notre connaissance de l'océan.

Modéliser le mouvement des animaux en mer en relation avec les variables de leur environnement, peut permettre de répondre aux questions liés à leur distribution. L'identification des principaux processus physiques de leur écosystème et les caractéristiques de l'espèce sont les premières étapes nécessaires à la réalisation de tout modèle couplant biologie et physique. Les processus physiques responsables du transport des sont fortement variables en temps et dans l'espace, ceci les rend difficiles à évaluer en se basant seulement sur des observations ou des campagnes de mesures *in situ*, les résultats ne donnant qu'une représentation partielle de la circulation océanique dans le milieu concerné. La modélisation de la circulation hydrodynamique des zones côtières apporte des réponses à ces problématiques grâce aux simulations numériques qui évaluent l'évolution de ces procédés

dans l'espace et dans le temps. Avec l'utilisation de modèles capables de simuler les courants marins, et donc le transport, il est possible de reproduire les trajectoires de n'importe quelles espèces passives, comme celles qui composent le groupe des méduses.

Pour répondre à la question des conditions hydrodynamiques qui conduisent à l'arrivée des méduses sur les côtes, des outils de modélisation ont été développés afin de prévoir les échouages en calculant les trajectoires de particules⁵ (i.e. méduses fictives). Les modèles de transport lagrangiens sont utilisés dans le suivi de transport de particules (Garraffo et al. 2001; Fossette et al. 2012; Guizien et al. in press). Ces études sont basées sur le transport lagrangien ; les dérives sont calculées en post-traitement avec les champs de vitesses issus des modèles. Il est ainsi possible avec ces modèles hydrodynamiques de calculer la dérive des méduses et déterminer la formation des blooms (Barz et al., 2006; Berline et al., 2013; Johnson et al., 2001; Moon et al., 2010). Cependant, les outils de modélisation sont limités au post traitement des sorties de courants par les modèles et considèrent les méduses comme des traceurs passifs, transportés uniquement par les courants océaniques.

Questionnements scientifiques

Afin d'estimer la relation entre les phénomènes physiques océanographiques et les agrégations de méduses *Rhizostoma pulmo* dans les Pertuis Charentais, nous avons développé dans cette thèse un modèle de transport, qui est utilisé pour des applications physiques de déplacements de flotteurs et des applications biologiques de transport de méduses. Les observations de méduses durant l'été 2011 ont été appuyées par des expérimentations avec des bouées dérivantes. Ces manipulations ont été menées par les chercheurs de l'Université de Swansea au pays de Galles, principalement par Sabrina Fossette en collaboration avec Graeme Hays sur un projet qui vise à comprendre comment se forment les agrégations de méduses et comment leurs mouvements sont influencés par les courants et leur propre comportement de déplacement⁶.

Ce travail de thèse présente ici une stratégie originale combinant des données d'observations et de suivis *in-situ* de méduses en milieu naturel avec la modélisation numérique afin de quantifier pour la première fois la contribution des comportements individuels et des courants de marée locaux à la formation et au maintien d'agrégations de méduses. Ceci nous permettra de comprendre comment les méduses réagissent aux courants de marée et comment le comportement de nage influence leurs trajectoires. Est-ce que les déplacements de méduses sont dictés exclusivement par les courants ? Ces questions sont intéressantes dans les domaines du comportement des animaux ainsi que pour la compréhension des mécanismes de formation des blooms de méduses.

⁵ Système d'Alerte sur la présence de méduses au large des plages azuréennes : www.medazur.obs-vlfr.fr

⁶ Connectivity of jellyfish populations: "Jellytrack": <http://www.jellytrack.co.uk>

Pour répondre au mieux à ces questions liées à la dérive des méduses et à leur comportement, un modèle de transport a été validé puis appliqué au transport de *Rhizoma pulmo* dans les Pertuis Charentais. Notre modèle a pour but d'estimer l'effet d'un comportement de nage opposé aux courants marins sur le transport et la dispersion des méduses. Ce comportement a-t-il un impact dans la formation des blooms ? Et est-ce que l'échouage des méduses évolue lorsque leur comportement de nage est modifié ?

L'application d'un modèle hydrodynamique couplant biologie et physique peut répondre à ces questions à travers la simulation du transport d'organismes dans un écosystème littoral complexe.

Ce manuscrit est composé de quatre chapitres et de plusieurs annexes :

Le **Chapitre I** se divise en deux parties. La première est caractérisée par une synthèse sur l'état des connaissances concernant le phénomène des marées, son observation et son analyse. Des définitions importantes du milieu océanique viennent compléter cette synthèse. La seconde partie présente la zone d'étude et son contexte hydrodynamique, en caractérisant les marées, les courants et les masses d'eau définies dans les études précédentes.

Le **Chapitre II** de ce manuscrit expose le développement du modèle Telemac 2D et les données utilisées et développées dans le cadre de cette thèse. Il regroupe l'exploitation de différentes données comprenant des mesures marégraphiques collectées au sein des Pertuis, des données ponctuelles de courantomètres et des bathymétries historiques et récentes.

Le **Chapitre III** rassemble les résultats concernant les simulations numériques de la marée en 2D ainsi que l'application de la méthode de calibration du modèle à l'aide d'images satellites.

Le **Chapitre IV** présente les résultats obtenus lors du transport des méduses dans les Pertuis Charentais. Les données *in situ* sur cette espèce, comprenant leur situation géographique ainsi que des mesures d'accéléromètre, ont été appliquées pour des simulations de transport de particules incluant plusieurs cas de vent et de comportement de nage actif ou passif.

Les **Annexes** incluent des résultats complémentaires sur les images satellites du Chapitre III, une analyse des résultats du modèle hydrodynamique 3D ainsi qu'un article scientifique tiré des résultats du Chapitre III.

CHAPITRE I. Caractéristiques hydrodynamiques des Pertuis Charentais

Etat des connaissances sur la marée et le transport de traceurs passifs

1. Généralités sur la marée et définitions

Les marées océaniques représentent le mouvement de la mer sous l'effet d'attraction gravitationnelle due à la Lune et au Soleil, l'attraction d'autres corps célestes étant négligeable. Lorsque l'on parle de la marée, il est nécessaire de connaître les termes couramment utilisés pour la décrire. Les variations du niveau marin, observées ou prédites, de la marée au cours du temps sont appelées *courbe de marée* (Figure 5). Ce niveau varie le long des côtes ainsi que dans les océans. Lorsque la marée monte, on parle de *flot*, de *montant* ou de *flux*. Ce niveau monte jusqu'à son maximum, c'est la *pleine mer*. Quand le niveau descend, on parle de *jusant*, de *reflux* ou de *perdant*. Il descend jusqu'à un minimum, c'est la *basse mer*. La différence de hauteur entre ces deux extremums consécutifs est le *marnage*. Lors des nouvelles lunes et des pleines lunes appelées *syzygies*, le marnage est à son maximum ; c'est la marée de *vive-eau*. Il diminue ensuite pendant une période appelée *déchet*, jusqu'à son marnage minimum ; c'est la marée de *morte-eau*. Enfin, le marnage augmente durant la période de *revif*.

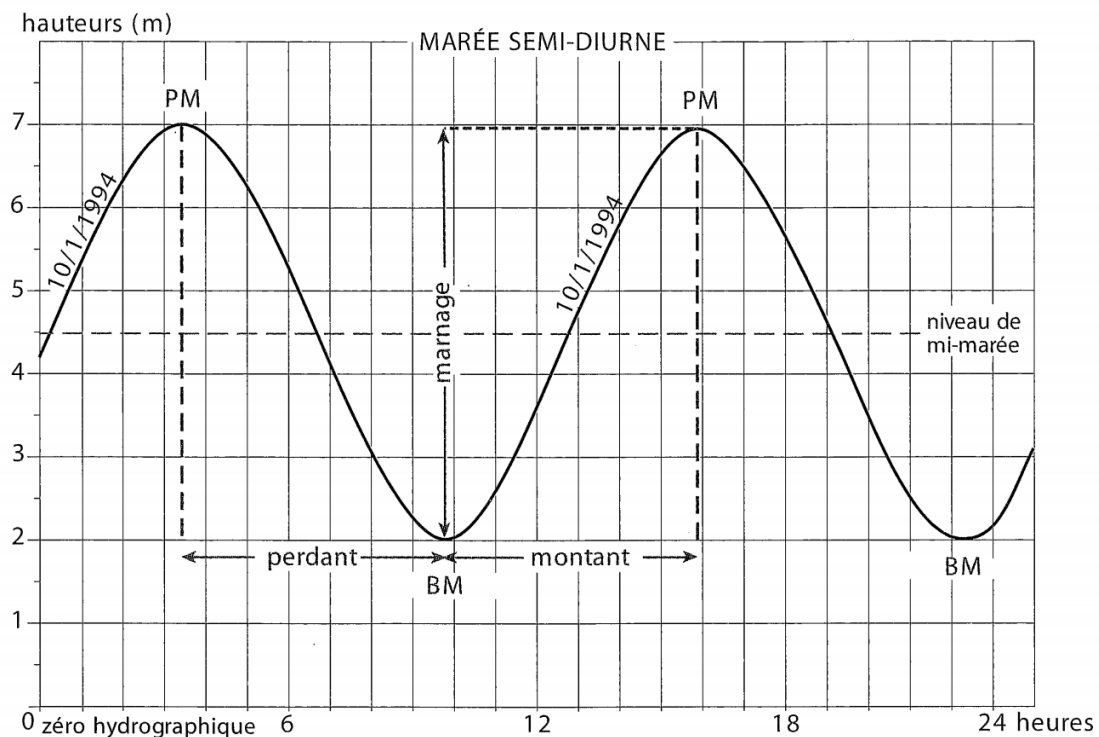


Figure 5 : Courbe de marée (Simon and Gonella, 2007). Avec La Pleine Mer (PM) et la Basse Mer (BM)

La marée est un phénomène périodique dont l'amplitude de ses oscillations au niveau de la mer est liée à la position de la Terre par rapport à la Lune et le Soleil. À la Rochelle, les

marées sont *semi-diurnes* avec deux hautes mers et deux basses mers par jour. On peut aussi observer dans le monde des marées *diurnes* (par exemple, au Vietnam) avec une haute mer et une basse mer par jour, ou encore des marées mixtes avec des successions irrégulières entre les basses mers et les hautes mers. Cette différence s'explique en termes de superposition des ondes de marée. Suivant l'onde dominante, on observera une marée différente. La force génératrice des marées varie suivant la position des astres, créant des marées de vive-eau avec une forte amplitude lorsque l'attraction de la Lune et du Soleil s'ajoute, ou au contraire, créant des marées de morte-eau avec des amplitudes faibles. La marée fait varier périodiquement le niveau de la mer ; ainsi, lorsque l'onde marée est haute en un point, elle est basse à un autre point. La différence de niveau entre ces deux zones provoque le déplacement de masses d'eau qui génère les courants de marée : des courants de flot ou des courants de jusant. Leurs vitesses sont dépendantes de l'amplitude de marée, de la géométrie des lignes de côtes et de la profondeur et de la nature du fond

Le Soleil influence aussi la marée, ce qui a pour conséquence d'interférer l'effet de la Lune sur les marées. La rotation de la Lune en 27,2 jours et sa position par rapport au Soleil sont à l'origine de différents scénarios.

Lorsque la Terre, le Soleil et la Lune sont alignés (syzygies), les forces sont additionnées et l'amplitude des marées est grande: ce sont les marées de vive-eau. Lorsque la Lune et le Soleil sont en quadrature (angle de 90°), l'amplitude est réduite : ce sont les marées de morte-eau.

Ces influences se retrouvent sur l'amplitude des marées et donc sur les hauteurs d'eau. Les variations du marnage sont visibles sur la figure suivante (Figure 6). La hauteur d'eau passe d'un minimum appelé morte-eau (ME) à un maximum appelé vive-eau (VE). Le revif est la partie où le marnage augmente et le déchet est la partie lorsque le marnage diminue. L'âge correspond à la période de temps entre une des phases de la Lune et de l'extrémum du marnage (minimum ou maximum).

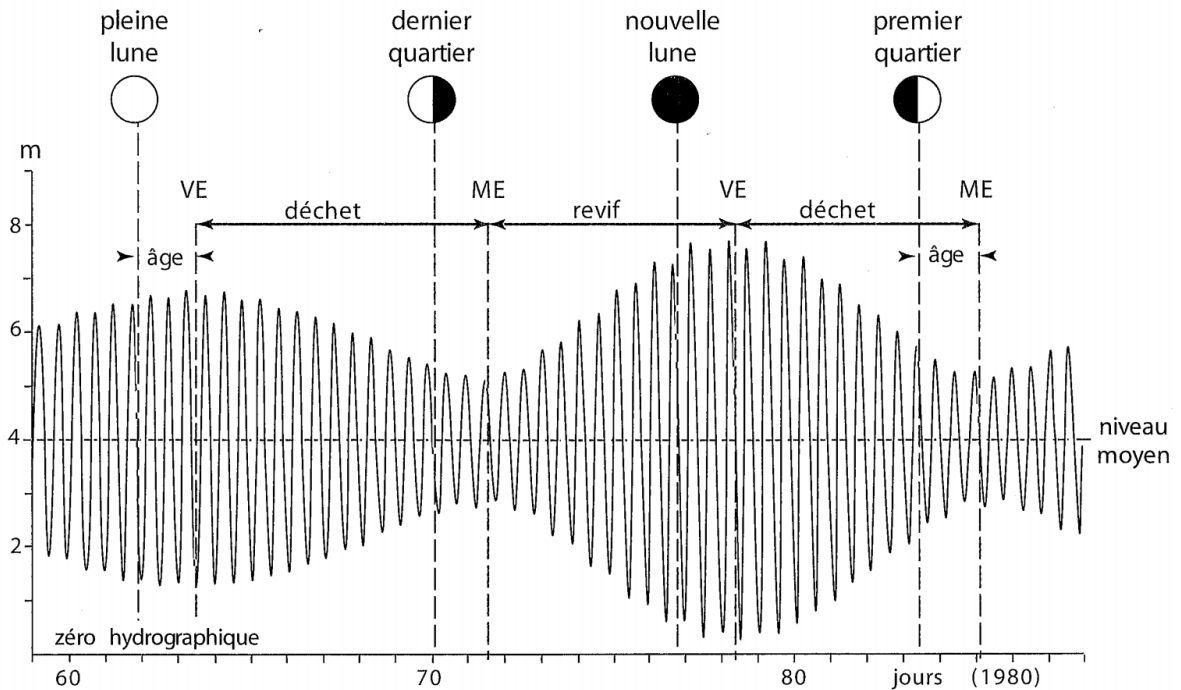


Figure 6: Variation la courbe de marée à Brest suivant les phases de la Lune sur 29 jours (Simon and Gonella, 2007).

2. Analyse harmonique

L'analyse harmonique est une démarche mathématique qui est basée sur la décomposition du potentiel de la force génératrice des marées en une somme de termes périodiques. L'analyse de la courbe de marée donne naissance à de nombreuses composantes qui correspondent à une amplitude et une phase de la marée.

La mesure marégraphique nous permet de déterminer les composantes harmoniques du lieu étudié à partir des hauteurs d'eau mesurées. C'est une démarche essentielle à l'étude hydrodynamique d'un lieu. Ensuite une analyse par la méthode des moindres carrés, permet d'extraire les composantes harmoniques du lieu étudié. Le spectre ainsi établi (Figure 7), nous permet de déterminer l'importance, en phase et en amplitude, de chacune des ondes de marée par rapport au lieu d'observation.

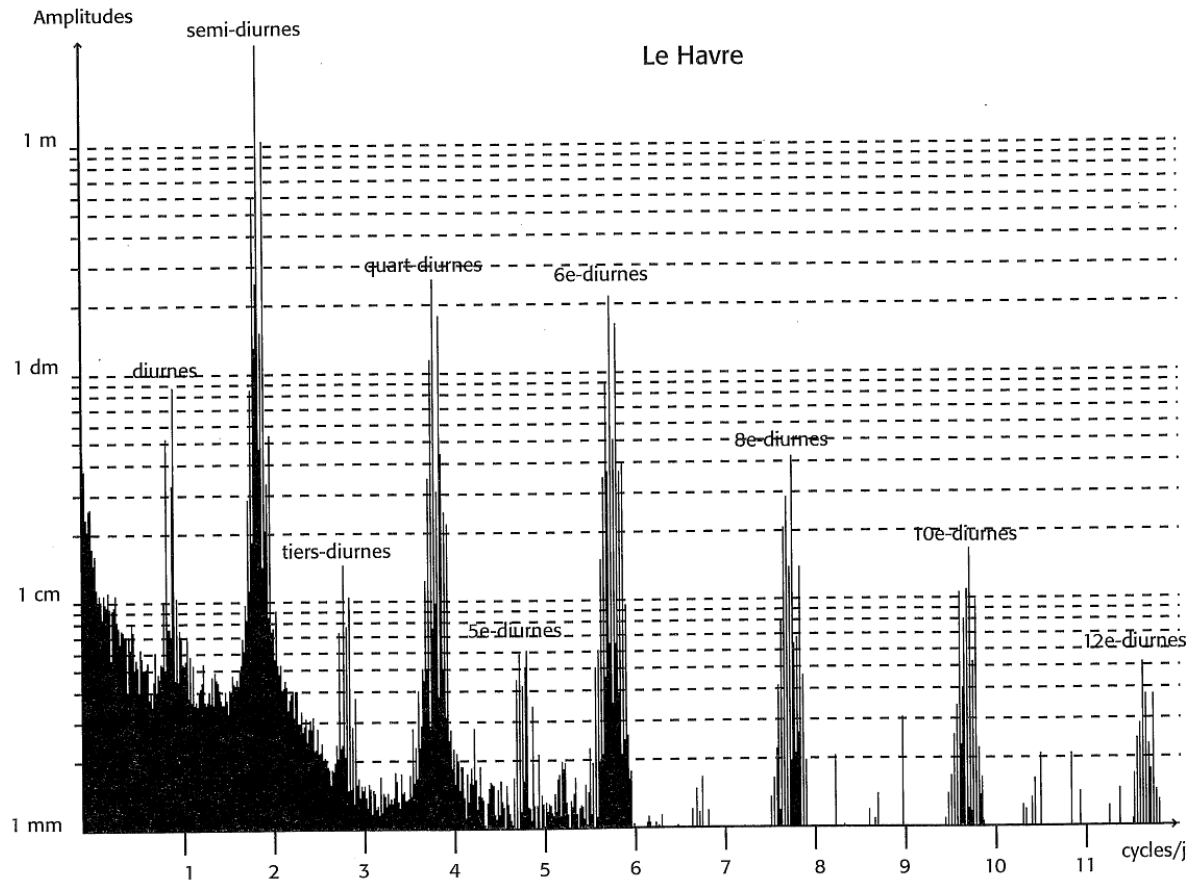


Figure 7: Exemple de spectre de la marée pour le port du Havre. Les abscisses exprimées en nombre de cycles par jour montrent la périodicité de chaque onde. On observe des pics de fréquences bien espacés les uns des autres, représentant les composantes harmoniques (Simon and Gonella, 2007).

Les composantes harmoniques sont groupées et forment des clusters suivant leur période. Pour cette raison, elles sont classées en grands groupes en fonction leur périodicité (Tableau 1): les ondes semi-diurnes (12h), les ondes diurnes (24h), les ondes de grande période dont la période varie selon l'onde concernée (bimensuelle, annuelle, trimestrielle, ...) et les ondes supérieures (quart-diurnes = 6h ; sixième diurnes = 4heures, ...).

La marée observée sur Terre est la superposition d'ondes élémentaires. Chacune de ces ondes correspond à la période des mouvements des astres et sont appelées composantes harmoniques.

Name of tidal component	Symbol	Period in solar hours	Coefficient ratio ($M_2 = 100$)
<i>Semi-diurnal:</i>			
Principal lunar	M_2	12.42	100
Principal solar	S_2	12.00	46.6
Larger lunar elliptic	N_2	12.66	19.2
Luni-solar	K_2	11.97	12.7
<i>Diurnal:</i>			
Luni-solar	K_1	23.93	58.4
Principal lunar	O_1	25.82	41.5
Principal solar	P_1	24.07	19.4
<i>Longer period:</i>			
Lunar fortnightly	M_f	327.86	17.2
Lunar monthly	M_m	661.30	9.1

Tableau 1: Composantes harmoniques principales de la marée ; Le coefficient de la dernière colonne représente le ratio d'amplitude de l'Onde par rapport à M_2 (Wright and Team, 1999)

Les noms correspondent à des informations sur l'onde. Par exemple, l'onde M_2 est un terme lunaire : M vient du mot Moon et 2 vient du fait que l'onde est semi diurne. Il en est de même pour l'onde solaire S_2 .

Dans les composantes qui dépendent du mouvement Lunaire, M_2 en est la principale. Si la Lune était parfaitement en ligne avec l'équateur, elle serait la seule onde. La déclinaison est à l'origine de nouvelles ondes. L'inclinaison de la Lune par rapport à l'équateur donne naissance à K_2 . Du groupe semi-diurne, N_2 , L_2 et $2N_2$ sont le résultat de l'effet de l'excentricité qui dépend du mouvement moyen du périégée lunaire qui est le point de l'orbite lunaire le plus rapproché de la Terre. N_2 et L_2 sont les termes elliptiques de premier ordre, avec e en facteur, tandis que $2N_2$ est de deuxième ordre (e^2). Les ondes diurnes les plus importantes sont O_1 et K_1 . Elles contiennent un terme d'inclinaison, $\sin I$. Dans les ondes lunaires à plus longue période, M_f est la plus importante avec un terme \sin^2 de l'inclinaison et une période de 15 jours.

Le Soleil est à l'origine d'un nombre moins important d'ondes. Dans les termes semi-diurnes, on retrouve S_2 , K_2 et T_2 . S_2 est directement créée par le Soleil. K_2 est lui dépendant du Soleil et de la Lune et leur somme forme un terme appelé luni-solaire. Pour les termes diurnes P_1 et K_1 dépendants du Soleil, K_1 est aussi un terme luni-solaire. Enfin, dans la classe des ondes à longue période, on retrouve S_{sa} et S_a qui sont respectivement semi-annuelle et annuelle.

Certaines ondes ne proviennent pas des astres mais des interactions non-linéaires entre les ondes principales et la bathymétrie. De nouvelles ondes apparaissent alors dans le spectre de la marée. Les eaux peu profondes, comme les Pertuis Charentais, voient par exemple

l'apparition de l'onde supérieure M4 qui provient de l'onde M2. Parmi ces nouvelles ondes, nous avons :

- Les ondes composées : elles sont dues à l'interaction de plusieurs ondes astronomiques différentes. Ces ondes viennent principalement des ondes M_2 , S_2 , K_2 , N_2 , K_1 et O_1 .
- Les ondes supérieures : elles sont dues à l'interaction d'une onde avec elle-même. M_2 et S_2 sont les deux principales ondes qui produisent des ondes supérieures.

La dénomination de ces ondes se fait en fonction des ondes astronomiques dont elles sont issues. En voici quelques exemples :

- $M_4 = M_2 + M_2$
- $MS_4 = M_2 + S_2$
- $2MS_2 = M_2 + M_2 + S_2$
- $3MN_4 = M_2 + M_2 + M_2 - N_2$

L'amplitude des ondes composées et des ondes supérieures est très dépendante de la géométrie du milieu où les ondes astronomiques se propagent, et est donc très variable. Ces ondes sont formées par le frottement de la colonne d'eau sur la bathymétrie, l'amplification de certaines ondes par résonance ou réflexion sur la rugosité des fonds marins va générer ces ondes supérieures. Le *Tableau 2* rappelle les ondes non-linéaires les plus importantes :

Nom de Darwin	Fréquence (°/h)	Période (jours)	Famille de composante
2SM₂	31,0158958	0,48362298	semi-diurne
2MS₂	27,9682084	0,53632323	semi-diurne
M₄	57,9682084	0,25876253	quart-diurne
MS₄	58,9841042	0,2543058	quart-diurne
M₆	86,9523127	0,17250835	sixième-diurne
2MS₆	87,9682084	0,17051615	sixième-diurne
M₈	115,9364169	0,12938126	sixième-diurne
3MS₈	116,9523127	0,1282574	huitième-diurne

Tableau 2 : Principales composantes non-linéaires (Lefevre, 2000)

Les amplitudes ne sont pas notées puisqu'elles dépendent entièrement du lieu considéré. Certaines ondes non-linéaires ont la même fréquence que les ondes astronomiques. Par exemple, $2MN_2$ et L_2 ont une fréquence commune de 29,5377626°/h. Lors de l'analyse harmonique d'un signal de marée, il est impossible de distinguer l'onde astronomique et l'onde non-linéaire avec ces ondes de même fréquence.

3. Type de marée

Suivant la dominance d'une famille d'ondes, la marée est classée selon 4 types (Figure 8):

- *Semi-diurne* : les composantes diurnes sont négligeables comparées aux composantes semi-diurnes. On observe deux marées hautes et deux marées basses par jour avec des amplitudes approximativement égales. Ce type de marée est observé notamment en Atlantique du Nord.
- *Diurne* : A l'inverse, les composantes semi-diurnes sont négligeables comparées aux composantes diurnes. On observe une marée haute et une marée basse par jour. Les marées diurnes sont observables dans le golfe du Mexique ou au Vietnam.
- *Semi-diurne à inégalités diurnes* : Dans ce type de marées, on observe toujours deux marées hautes et deux marées basses par jour mais aucune composante n'est négligeable. Les hauteurs d'eaux entre deux pleines mers consécutives seront inégales.
- *Mixte* : C'est un cas spécifique où les composantes diurnes sont très importantes mais elles dépendent de la position de la Lune. Lorsque la Lune est à l'équateur, on aura deux pleines mers et deux basses mers par jour. Si la déclinaison de la Lune est à son maximum, seulement une marée haute et une marée basse seront visibles par jour.

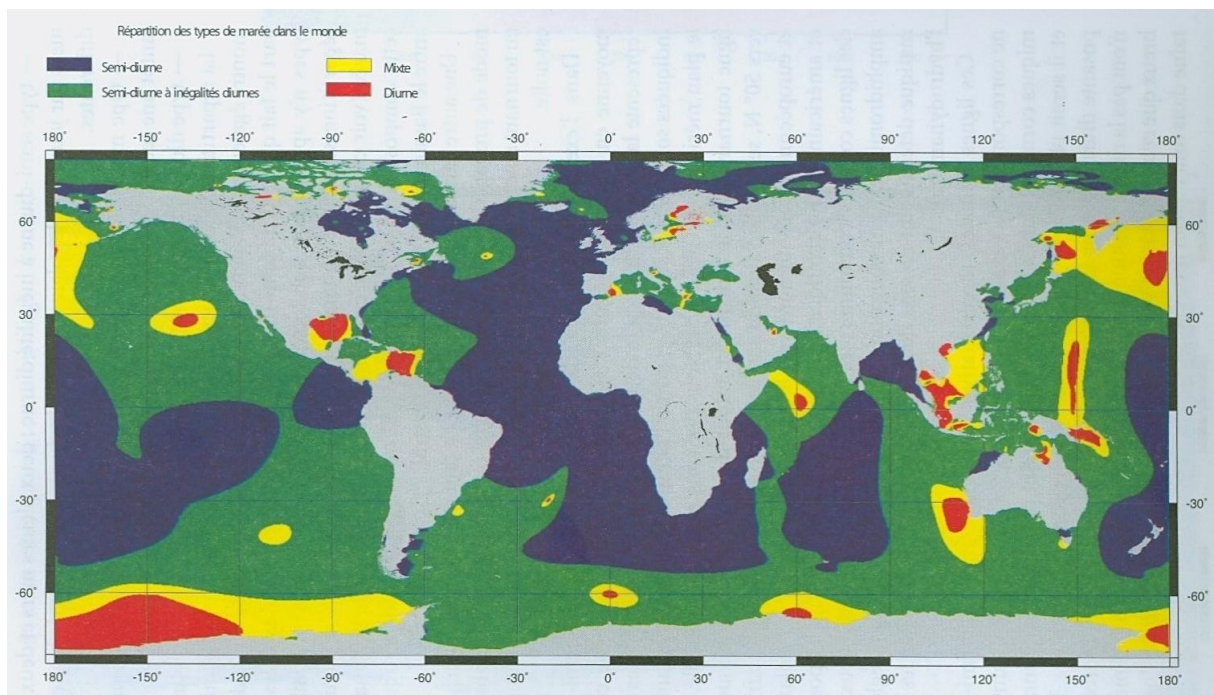


Figure 8: Répartition des quatre types de marées dans les trois océans (Simon and Gonella, 2007).

La classification de la marée est exprimée par un rapport entre les amplitudes des composantes diurnes et semi-diurnes. Ce facteur F est calculé avec la formule suivante :

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (1)$$

Les amplitudes diurnes en numérateur incluent les ondes K_1 et O_1 respectivement lunaire et solaire, sur le dénominateur des amplitudes semi-diurnes S_2 solaire et M_2 lunaire. Selon la valeur de F , on aura :

- $F = 0,00 - 0,25$: Semi diurnes
- $F = 0,25 - 1,50$: Semi-diurnes à inégalités diurnes
- $F = 1,50 - 3,00$: mixtes
- $F > 3,00$: Diurnes

4. Transport de traceurs

Les courants océaniques entraînent les transferts divers et variés des espèces biologiques. A titre général, les courants marins sont parfois divisés en deux groupes (Simon & Gonella 2007) :

- Les courants de marée, appelés courants "*gravitationnels*"
- Les courants radiationnels comprenant les courants induits par les vents, les courants liés aux vagues, les courants qui résultent de différence de densité ou de l'évaporation variable en espace

En parlant de transfert de la matière, nous utiliseront le terme générique de « traceurs ». Les traceurs symbolisent une grandeur physique quelconque (sédiment, colorant, polluant, etc.) contenue dans l'eau ou la température. Selon Jenkins (2006), les traceurs constituent une catégorie générale de composées océaniques qui sont présents en quantité suffisamment infimes (traces) pour ne pas influencer directement la densité du fluide et son comportement. Dans le cas où le traceur interagit directement avec son environnement et modifie l'hydrodynamique de l'écoulement, il est dit actif, sinon il est dit passif. Les traceurs les plus banals et régulièrement utilisés dans les études océaniques sont la température et la salinité, parfois le sédiment. Il est intéressant de noter que la température et la salinité n'entrent pas techniquement dans la définition stricte des traceurs passifs et qu'elles ont donc été dénommées « traceurs actifs » (Quéguiner, 2009). Malgré cela, la plupart des études utilisant la salinité ou/et la température comme traceur les considèrent « passifs ». L'important à retenir dans cette définition est que les traceurs suivent les mouvements des masses d'eau. D'un point de vue physique, l'évolution du traceur dans un domaine dépend :

- Du courant qui l'entraîne (convection),
- De la diffusion (qui sera presque toujours turbulente) et de la dispersion.
- Des limites d'origine lors de la création ou la disparition du traceur.

Un traceur passif n'a donc par définition aucune influence sur la structure des courants qui le transportent. Il est déplacé comme une (ou des) particule(s) d'eau, suivant les mouvements des masses d'eau. Ceci est en fait un outil très pratique lors d'études

hydrodynamiques. Par exemple, en suivant le transport d'un traceur dans un domaine, on peut en comprendre la circulation. D'un point de vue expérimental, on distingue deux types de traceurs.

Les traceurs naturels : la salinité, dont nous avons déjà parlé auparavant, est le traceur naturel le plus utilisé dans les études estuariennes et côtières à cause de la teneur en eau non salée venant principalement des fleuves alentours. La température peut être aussi utile lorsque la chaleur ou le froid dus à des phénomènes extérieurs (comme le soleil) ne peuvent être négligés. Le changement de température est apparenté à l'advection et la dispersion. Enfin le suivi de concentration de composés chimiques présents naturellement dans l'eau de mer tel que les nutriments, l'ammoniaque ou la concentration d'ion de l'hydrogène (Ph).

Il existe aussi une deuxième catégorie de traceurs, ceux mis dans le domaine par l'homme : en premier on peut utiliser des colorants pour quantifier le mélange dans des régions côtières. Les colorants restent en surface et peuvent être facilement suivis à l'œil par des moyens aéroportés ou par bateau avec des sondes appropriées qui mesurent la concentration du colorant comme la Rhodamine. Les traceurs radioactifs, le Brome-82 ou le tritium sont utilisés pour déterminer la dispersion (Germain and Salomon, 1991). Ils sont utilisés de la même façon que sont exploités les colorants (Lewis, 1997).

5. Méthodes de calcul des constantes de temps

Dans les systèmes côtiers et estuariens, l'eau transporte différentes matières, aussi bien particulières (grains de sable, biofilm, larves, etc.) que dissoutes (polluants, sels nutritifs, etc.). Le devenir des particules d'un système constitue donc une problématique légitime lorsque l'on se penche sur l'étude des écoulements de fluides géophysiques comme les océans. Pour caractériser leur système (en hydrologie ou biologie par exemple), de nombreux auteurs calculent les temps de transport des masses d'eau de leur zone d'intérêt (Struski, 2005). La littérature contient de nombreuses appellations pour définir les échelles de temps du transport comme par exemple le temps de chasse, le temps de transit, le temps moyen de transit, le temps de résidence, le temps de résidence local, le temps de résidence moyen, l'âge et l'âge moyen (Abdelrhman, 2005). En examinant de nombreux articles, Monsen et al (2002) ont constaté que les calculs du temps de transport peuvent être séparés en trois groupes. Chaque groupe s'appropriant une définition et une formulation mathématique différente du temps de transport, on peut ainsi dégager trois concepts: le temps de transit, l'âge et le temps de résidence.

Ce sont des valeurs de temps caractéristiques que l'on peut évaluer *a posteriori*. Elles sont des outils de diagnostic aidant à comprendre l'écoulement étudié et sont « influencées par l'écoulement, mais n'influencent pas l'écoulement » (Determinig, 1998). Le temps de résidence se définit comme le temps nécessaire pour une masse d'eau pour sortir du domaine d'intérêt en partant d'un endroit spécifique. L'âge peut être considéré comme la réciproque du temps de résidence puisqu'il s'agit du temps mis par une masse d'eau pour atteindre le point

considéré depuis une frontière ouverte du domaine d'intérêt (Figure 9). Le temps de chasse, appelé aussi « flushing time » en anglais, est défini comme le temps nécessaire à un système pour renouveler son volume d'eau initial. Une dernière échelle de temps employée est le temps de transit qui est la somme de l'âge et du temps de résidence.

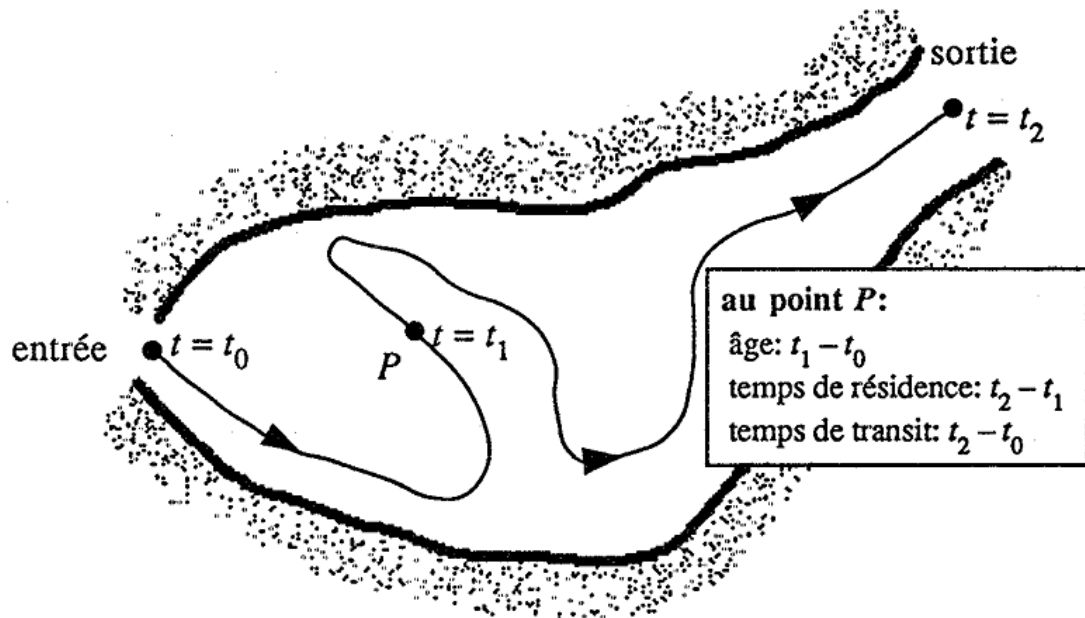


Figure 9 : Illustration du temps de résidence, du temps de transit et de l'âge avec une particule qui rentre dans un domaine au temps $t=t_0$ et ressort au temps $t=t_2$ (Determinig, 1998)

Ces échelles de temps peuvent être évaluées aux moyens d'expériences *in situ*. Il est également possible de les estimer, selon une approche lagrangienne ou eulérienne, à l'aide de modèles numériques hydrodynamiques. En pratique, le temps de résidence et le temps de chasse sont des indicateurs pour estimer la pérennité d'un polluant ou d'un organisme biologique dans une baie ou un estuaire avant d'en être expulsé par l'action de la marée ou l'écoulement d'une rivière.

Temps de chasse

Le temps de chasse (T_f) est une grandeur qui décrit les caractéristiques générales d'échanges d'un système hydrodynamique sans identifier les procédés physiques impliqués, l'importance relative de ceux-ci ou leur distribution spatiale (Monsen et al., 2002). La définition du temps de chasse par Geyer (2000) est donnée comme la masse de la matière rapporté au taux de renouvellement de la matière. Cette grandeur peut donc être exprimée comme le volume d'eau d'un système (S), défini et délimité, divisé par le débit d'écoulement volumétrique (Q) qui passe par ce système (Monsen et al., 2002) :

$$T_f = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

Pour des éléments conservatifs, des quantités miscibles associées à l'eau, le temps de chasse peut être défini autrement (Monsen et al., 2002) :

$$T_f = \frac{M}{F} \quad (3)$$

Où :

- M est la masse considérée dans le domaine
- F est son flux à travers le domaine.

L'utilisation de cette formule demande l'estimation du volume du système ainsi que le taux d'échange à travers celui-ci comme l'écoulement ou flux de masse.

Cependant, il est courant que les valeurs de V (ou M) et Q (ou F) ne soient pas connues. Le calcul de T_f est donc basé sur la supposition que le système hydrodynamique réagit comme un réservoir parfaitement homogène ayant un débit constant appelé Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR). Le temps de chasse peut ainsi être estimé à travers le temps grâce aux observations de la concentration d'un élément dissous à la sortie du système. La principale hypothèse de cette méthode est que la quantité de traceur introduite initialement est immédiatement mélangée de manière homogène sur l'ensemble du domaine. Ainsi, la concentration d'un constituant reste la même quelle que soit sa place dans le domaine. Si un constituant est injecté dans une CSTR à l'instant $t=0$ avec une concentration initiale C_0 , sans ajout de ce constituant dans le domaine après t_0 et que le débit à l'intérieur du domaine reste constant, alors la concentration à l'intérieur du domaine est (Thomann and Mueller, 1987) :

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} = C_0 e^{-\frac{t}{T_f}}$$

Dans ce cas, avec un débit et un volume constants à l'intérieur du système, la concentration du traceur diminue au cours du temps par simple chasse des masses d'eau selon une courbe exponentielle décroissante comme indiqué sur la Figure 10 :

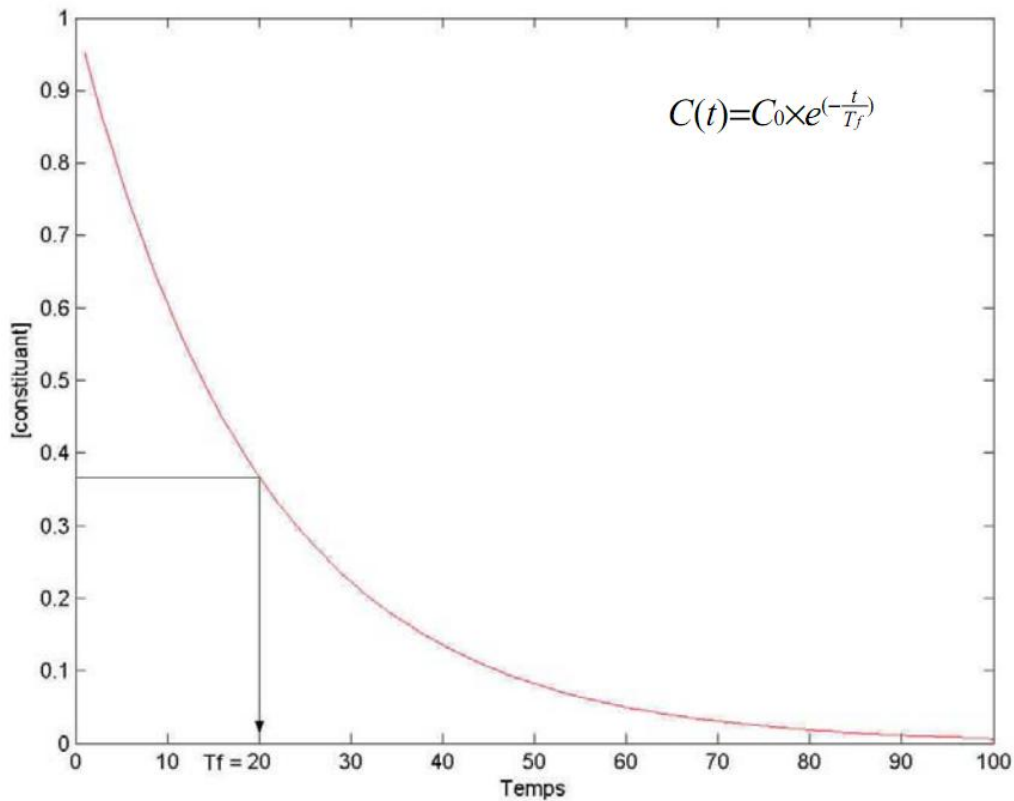


Figure 10 : Courbe de concentration théorique d'un constituant dans un CSTR et son équation (Plus et al., 2006)

Dans cet exemple, T_f , le temps de résidence moyen, est égal à 20 unités de temps, ce qui correspond au temps mis pour que 37% (soit e^{-1} dans la formule précédente lorsque le temps de chasse est égal à t) de la concentration initiale du constituant reste dans le domaine. Le temps de chasse implique l'expulsion totale de l'eau du système, or nous avons ici une courbe exponentielle. Le traceur ne sera jamais entièrement éliminé du système avec cette méthode, donc le temps de chasse ne peut pas se terminer. Les résultats obtenus par la méthode CSTR reflètent seulement le temps moyen d'une masse passant dans un système.

Le temps de chasse était défini à l'origine pour les lacs. Dans un tel cas lorsque le constituant dépassait la limite imposée par le domaine, il était considéré comme « perdu » définitivement. Pourtant, dans un système tidal, le constituant va être amené à revenir à cause des oscillations des marées. Malgré ceci, la méthode est applicable pour les marées. Les oscillations sont alors ajustées sur le modèle exponentiel afin de prendre en compte du retour du constituant dans le domaine à cause de la marée (Monsen et al., 2002).

Cependant, le modèle CSTR montre ses limites dans l'évolution des concentrations pour un système tidal côtier à l'hydrodynamique complexe. Le temps de chasse est alors un paramètre peu robuste, sensible à la durée de simulation puisque plus celle-ci augmente, plus le temps de chasse augmente. Dans l'exemple d'un bassin fictif de la Figure 11, passés les soixante jours, la concentration ne varie pratiquement plus, ce qui a pour cause de modifier la courbe du modèle CSTR et d'augmenter le temps de chasse. La solution à ce problème est de prendre en considération l'enveloppe supérieure de la concentration simulée pour le temps de

chasse (point bleu, Figure 11). En prenant l'enveloppe supérieure dans le calcul du temps de chasse, on peut calculer le temps nécessaire pour que la concentration moyenne du traceur dans le bassin fictif tombe sous la valeur e^{-1} (Plus et al., 2006).

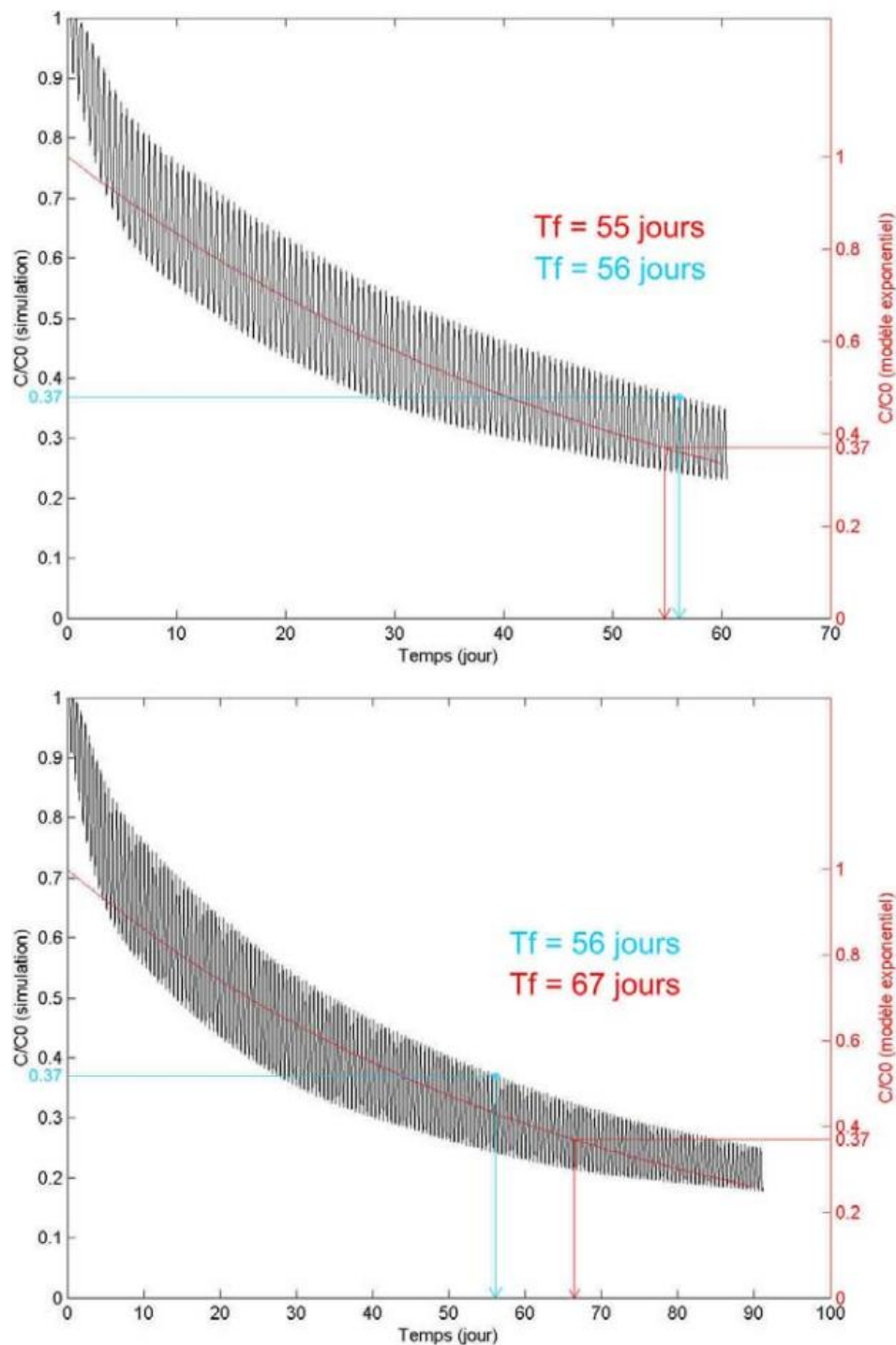


Figure 11 : Exemple de courbes de concentration dans un bassin fictif sous l'influence de la marée en fonction du temps, pour une simulation de 60 jours (en haut) et une autre de 90 jours (en bas). Avec en rouge la valeur de T_f obtenue avec le modèle exponentiel et en bleu la valeur de T_f en prenant l'enveloppe supérieure

Une alternative pour le calcul du temps de chasse dans les systèmes tidaux est la méthode du prisme tidal (Tidal Prism Method). C'est une approche classique lorsque la

géométrie du bassin et le marnage sont les seules données à disposition. Cette méthode suppose que les marées sont uniquement responsables du temps de chasse (Dyer, 1997). Le temps de chasse est alors calculé par :

$$T_f = \frac{VT}{(1 - b)P} \quad (4)$$

Où :

- P est le prisme tidal. Équivalent au volume d'eau à l'intérieur du système entre la marée basse et la marée haute. Ce volume peut être estimé par le marnage du système (R) multiplié par la surface du domaine au niveau moyen de la mer. Si l'on divise P par la période de la marée (T), on convertit le prisme tidal en débit d'écoulement.
- V est le volume moyen du bassin.
- b est le facteur de retour de flux, il représente la fraction d'eau effluente (entre 0.0 et 1.0) qui s'échappe du système et qui est ramenée à chaque marée montante.

Ici aussi plusieurs hypothèses sont obligatoires pour cette méthode :

- Le système doit être bien mélangé.
- Le débit de rivière doit être faible comparé aux « débits » de marée.
- Les eaux qui sont directement sorties du système doivent être évacuées dans un très grand volume d'eau permettant ainsi d'être diluées rapidement, afin de ne pas changer la qualité des eaux et de ne pas changer matériellement les effluents.
- Le système doit être à un état stationnaire et doit aussi être soumis à une marée sinusoïdale.

La méthode du prisme tidal tend à sous-estimer les temps de chasse car elle suppose que le système est bien mélangé. Cependant Luketina (1998), par plusieurs modèles de prismes tidaux, améliore les résultats du temps de chasse estimé.

Âge

Contrairement au temps de chasse, l'âge est une valeur unique à chaque particule d'eau qui entre dans le domaine d'intérêt. Zimmerman (1988) le décrit comme le temps mis par une masse d'eau entre le moment où elle est entrée dans l'estuaire jusqu'à son arrivée à un lieu spécifique. Ce concept directement lié à l'âge est l'hétérogénéité spatiale : les particules d'eau faisant partie de la même masse d'eau mais venant de différents endroits auront des âges différents car elles viennent d'une partie de la frontière « entrante » différente à un moment $t=0$ divergent.

Temps de résidence

Une particule d'eau reste dans un milieu durant un temps imparti, c'est son temps de résidence. Cette notion est le temps mis par une particule d'eau choisie de n'importe quel endroit du domaine jusqu'à ce que celle-ci le quitte. Le temps de résidence est donc mesuré à partir d'une masse d'eau spécifique choisie arbitrairement dans le domaine.

L'âge et le temps de résidence se complètent. Le premier estime le temps mis par une particule d'eau pour voyager de la frontière du domaine jusqu'à un endroit spécifique, le second estime le temps que la particule d'eau mettra pour quitter le domaine en partant d'un endroit spécifique. L'âge et le temps de résidence sont dépendants de la frontière spécifiée dans le domaine, du point de mesure à l'intérieur du domaine et, dans des systèmes tidaux, du temps de décharge. Lors de la modélisation de traceurs avec un modèle hydrodynamique, il est plus approprié d'utiliser le terme de temps de résidence locale car ce n'est pas une masse d'eau que l'on suit mais un emplacement unique à un moment choisi.

Différences entre la théorie et la réalité :

Nous avons défini ici les trois échelles de mesure du temps de transport principalement utilisées lors d'études sur la dispersion. Il existe cependant des différences entre ces exemples idéalisés et les systèmes réels. Aussi, les principales différences lors d'applications à des systèmes réels sont :

- Les écoulements ne sont pas réguliers.
- Il existe une variabilité spatiale dans la bathymétrie, dans la circulation et dans les échelles de temps du transport.
- La marée rajoute une échelle de complexité qui n'est pas prise en compte dans les cas idéalisés (Cf. paragraphe sur le temps de chasse).

6. Dispersion et diffusion en milieu marin

Comme il a été décrit précédemment les traceurs sont pour la plupart sujets à la diffusion et à la dispersion dans le milieu marin ; il est clair que ces facteurs détermineront leurs trajets dans le domaine et leurs concentrations pendant le transport. La diffusion est donc un facteur déterminant dans le suivi des traceurs passifs comme les colorants. La dispersion est aussi à prendre en compte puisqu'elle intervient dans le mélange du traceur par des phénomènes physiques.

La compréhension des modes de fonctionnement des écoulements des fluides géophysiques, c'est-à-dire les océans et l'atmosphère, passe par l'étude des phénomènes physiques qui les composent. La distribution des traceurs dans l'océan, les estuaires, les bassins semi-fermés, les zones côtières, les lacs ou les fleuves sont tous gouvernés par différents processus. L'importance de chaque procédé varie suivant les lieux et les conditions initiales de chaque site. Il est donc clair que l'étude de l'hydrodynamique locale est la clef qui permettra de comprendre les procédés responsables du transport d'où deux grands principes ressortent, la diffusion et la dispersion.

Définition de la zone d'étude : les Pertuis Charentais

1. Présentation géomorphologique

Le département de Charente Maritime représente 6% du littoral français, soit 440 km de côtes, y compris les îles (L'île d'Oléron, île de Ré, île Madame et Île d'Aix). Situé le long de la côte atlantique française dans la partie nord-est du golfe de Gascogne, le plateau continental est étendu au large de la Charente maritime et remonte en pente douce jusqu'aux larges estrans vaseux, qui sont en zone peu profonde (entre 0 et 10 m sur 5 km) le long de la côte (Figure 12). Au Nord de l'estuaire de la Gironde se trouvent les deux îles majeures, Ré et Oléron. Ces îles protègent la côte et délimitent des zones abritées appelées Pertuis. L'ensemble, appelé aussi la mer des Pertuis Charentais, forme une zone d'environ 100 km de large pour 200 km de long ; la mer des Pertuis est donc une mer peu profonde caractérisée par de nombreux estrans (Macur, 1999; Nicolle, 2006).

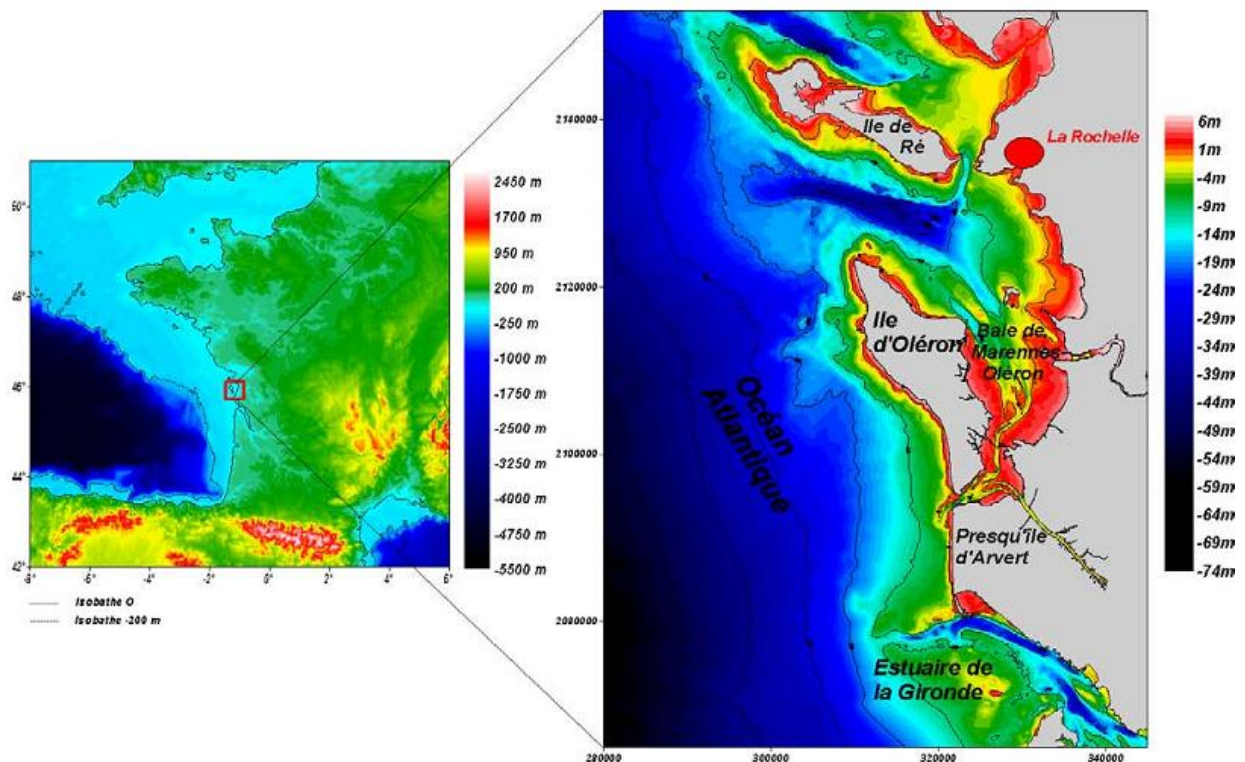


Figure 12: Carte de la bathymétrie simplifiée du Golfe de Gascogne et des Pertuis Charentais (Bertin, 2005)

Les Pertuis Charentais incluent trois Pertuis:

- Le Pertuis Breton au nord est formé par la côte vendéenne et l'île de Ré (Weber et al., 2004). C'est un canal semi fermé selon un axe Nord/Ouest-Sud/Est de 10 km de large sur 25km de long ayant une profondeur de 40m dans la fosse de Chevarache qui s'amenuise et devient moins profond dans la partie Sud/Est. Il communique au Nord par une ouverture de 10km de large avec les eaux océaniques et avec le Pertuis

d'Antioche au Sud via le courrou de la Pallice qui est plus étroit (inférieur à 2km de large).

- Le Pertuis d'Antioche fait 35km de long sur 15km de large et sépare les deux îles. À l'Ouest, le Pertuis communique avec les eaux océaniques par une large ouverture et s'ouvre au Sud sur la Baie de Marennes-Oléron au niveau de l'île d'Aix. C'est un passage resserré entre l'île d'Oléron et le continent qui comprend aussi une fosse centrale dont la profondeur atteint 35m. Une circulation résiduelle Nord Sud est présente dans la Baie de Marennes-Oléron entre le Pertuis d'Antioche et le Pertuis de Maumusson (Dechambenoy et al., 1977; Nicolle, 2006).
- Le Pertuis de Maumusson est un passage resserré qui termine la Baie de Marennes-Oléron et qui la relie à l'océan (Bertin et al., 2005; Tesson, 1973).

Quatre fleuves côtiers débouchent dans la mer des Pertuis. Se déversant dans la baie de l'Aiguillon, la Sèvre-Niortaise pose un débit moyen de $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Les deux fleuves situés au nord et au sud de la baie de Marennes-Oléron sont la Charente et la Seudre. La plus importante, la Charente, a un débit fluctuant entre 10 et $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit hivernal moyen de $76 \text{ m}^3/\text{s}$). La Seudre possède un débit 100 fois plus petit (débit hivernal moyen de $1 \text{ m}^3/\text{s}$) (Soletchnik et al., 1998). La Gironde, avec son estuaire localisé au sud des Pertuis Charentais, possède de loin le plus gros débit. Il varie de $235 \text{ m}^3/\text{s}$ en été à $1450 \text{ m}^3/\text{s}$ en hiver avec une moyenne annuelle de $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (Hermida et al., 1998).

2. Contexte Hydrodynamique

La marée

La zone des Pertuis Charentais est soumise à une marée semi-diurne (Figure 13); les ondes M2 (lunaire de période 12h24) et S2 (Solaire de période 12h) sont prédominantes. L'onde de marée vient de l'océan Atlantique et poursuit un mouvement du Sud vers le Nord. Lorsqu'elle est au large, l'onde de marée a une amplitude (très petite) inférieure à 1 mètre, qui vient s'amplifier sur les petits fonds des Pertuis.

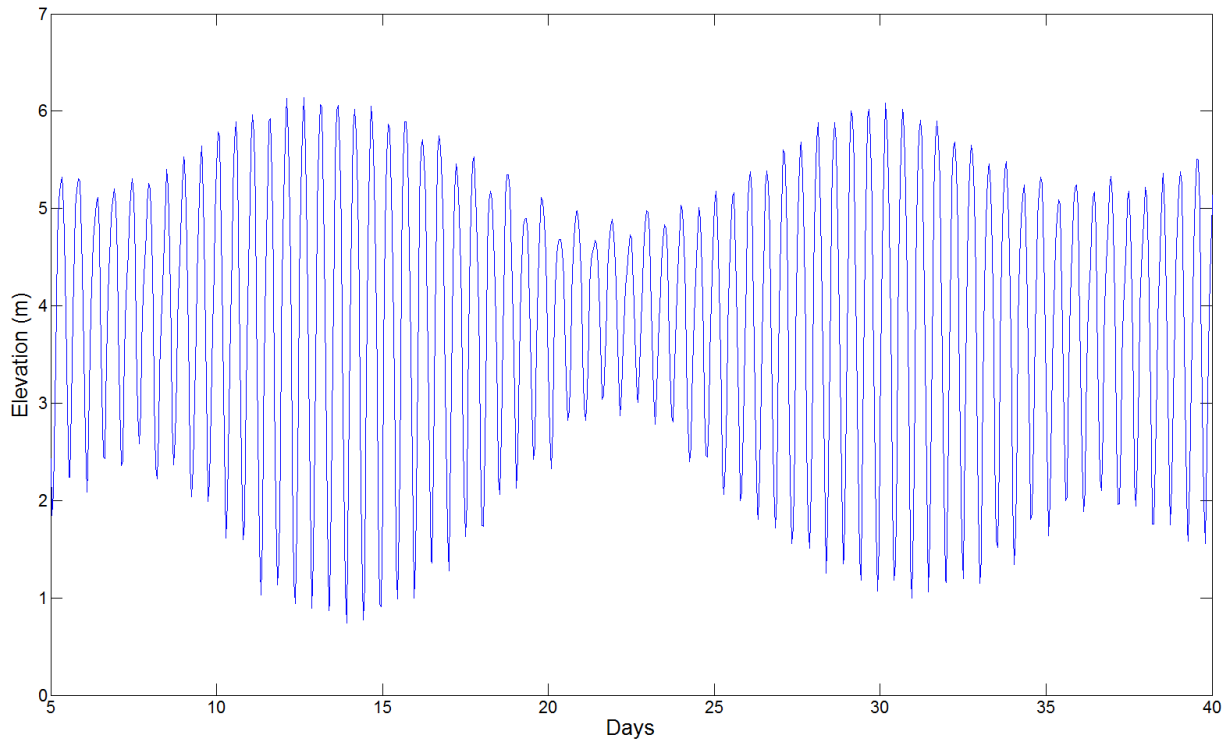


Figure 13: Courbe de la marée à La Rochelle, pour le mois de janvier 2001. Avec le cycle de vive eaux/morte eaux et la mise en évidence des asymétries diurnes.

Le marnage moyen est de 4m (régime macrotidal), avec des maximums en vive eaux exceptionnelles pouvant atteindre 6 m et un minimum de 2 m en morte eaux.

La figure suivante montre l'analyse harmonique des données marégraphiques de la Pallice analysées grâce au logiciel *t_tide* (Pawlowicz et al., 2002) sur une période d'un an (données S.O.N.E.L, <http://www.sonel.org>), suivie du tableau des phases et amplitudes des ondes principales de marées de la zone d'étude:

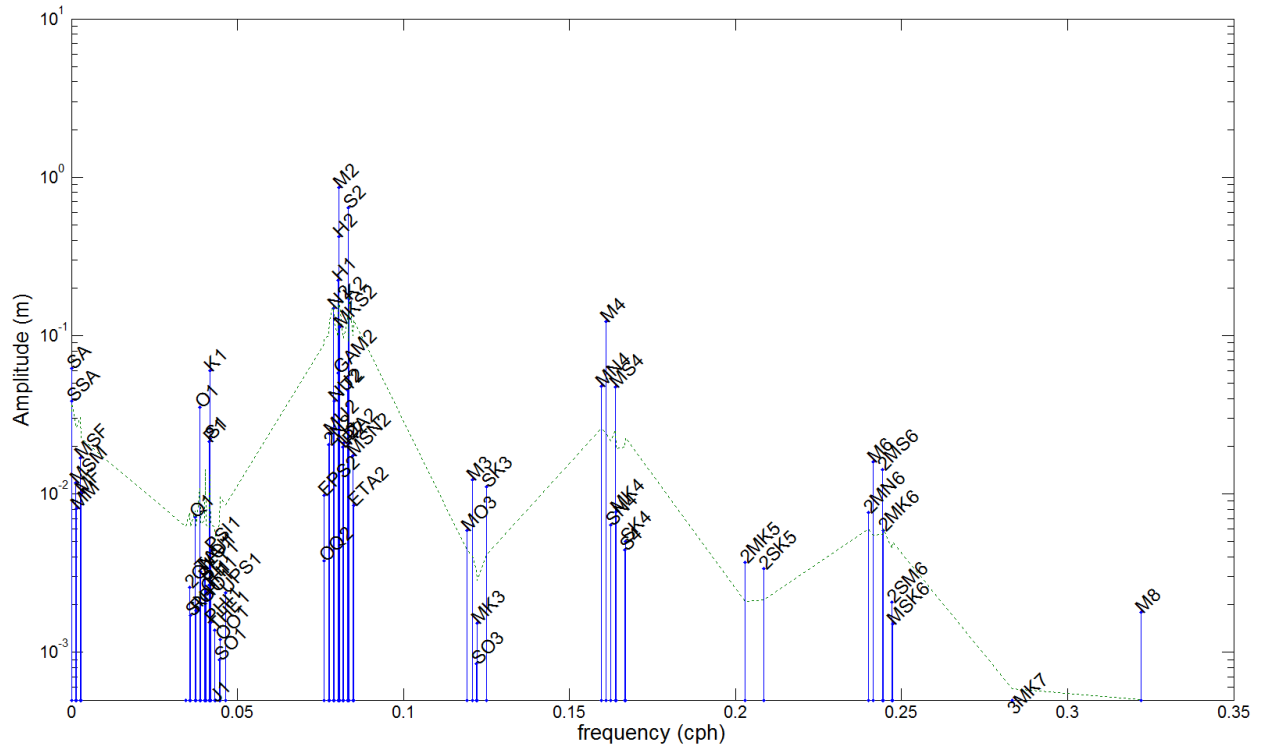


Figure 14: Spectre de la marée à la Pallice pour l'année 2001

Onde	Période (h)	Amplitude (m)	Phase (°)	Nom de la composante
M2	12,42	1,7441	98,22	Lunaire moyenne
S2	12	0,6165	130,47	Solaire moyenne
N2	12,65	0,3638	79,12	elliptique majeure
M4	6,21	0,249	8,29	Harmonique de M2
K2	11,96	0,1797	129,56	déclinationnelle
MN4	6,26	0,1099	319,69	
MS4	6,1	0,0985	92,92	
O1	25,81	0,0701	324,49	Lunaire principale
K1	23,93	0,0682	74	déclinationnelle
NU2	12,62	0,0628	83,89	évectionnelle majeure
SSA	182,62	0,0579	358,64	semi-annuelle
MU2	12,87	0,0573	69,71	
L2	12,19	0,0492	97,37	elliptique mineure
2N2	12,9	0,0486	55,75	elliptique 2 nd ordre
M6	4,14	0,0407	313,57	Harmonique de M2
MF	13,66 (jours)	0,033	238,48	bimensuelle
M3	8,28	0,0325	338,97	
MK4	6,09	0,0302	95,48	
2MS6	4,09	0,0291	350,48	
2MN6	4,16	0,0262	290,01	

Tableau 3: Résultats de l'analyse harmonique des 20 ondes principales de marées à la Pallice pour l'année 2001 en temps universelle plus une heure.

Les Pertuis sont sujets à une marée asymétrique qui s'observe surtout lors de morte eaux ou de déchet. La combinaison des larges estrans, un frottement sur le fond et une géométrie de la bathymétrie particulière contribuent dans l'amplification de l'onde M4 dont l'amplitude atteint 25 cm à la Pallice, ce qui est proche de l'amplitude de la composante astronomique N2. Dans des environnements semi-diurnes et peu profonds, la génération d'ondes d'ordre supérieur telles que M4 ou M6, et leur interaction avec l'onde M2 sont à l'origine de l'asymétrie de la marée (Nicolle, 2006; Speer and Aubrey, 1985).

Spectroscopie tidale

Un travail de collecte de données marégraphiques sur le terrain et dans les bases de données françaises a été mené. Ces données, en plus de nous apporter une carte des harmoniques de marée présentes dans le Pertuis Charentais, sont cruciales à la calibration d'un modèle numérique de marée. Les données proviennent de plusieurs services de surveillance côtière. La figure suivante représente l'ensemble des données marégraphiques localisées qui ont été récoltées puis analysées durant cette thèse :

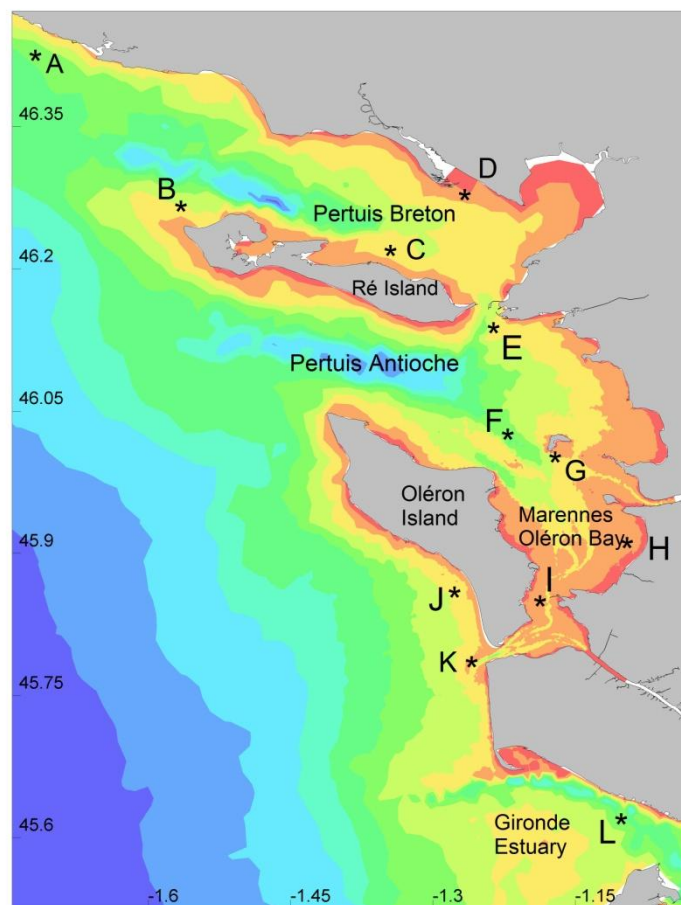


Figure 15 : Carte de l'ensemble des marégraphes : (A) Sables d'Olonne, (B) Baleineaux, (C) St Martin de Ré, (D) Pointe de l'Aiguillon, (E) La Pallice, (F) Fort Boyard, (G) Île d'Aix, (H) vasière de Brouage, (I) Le Chapus, (J) La Cotinière, (K) Gatseau, (L) Royan

Dans l'ensemble de ces marégraphes, l'enregistrement le plus important provient du marégraphe permanent de la Pallice, situé au port de La Rochelle. Les autres sites ne fournissent que les résultats de campagnes de courte-durée ou sont les résultats de mesures ponctuelles faites par le passé.

Entre décembre 1996 et janvier 1997, le SHOM a organisé une campagne de mesure marégraphique dans les Pertuis Charentais. Ces mesures regroupent les sites des Baleineaux, Saints Martin de Ré, l'Aiguillon, l'Île d'Aix, Fort Boyard, le Chapus, et la Pointe de Gatteau. Depuis 2011, le SHOM collecte les données marégraphiques disponibles le long du littoral français au sein des différents organismes maritimes. Le site de Réseaux de référence des observations marégraphiques (REFMAR, <http://refmar.shom.fr>) met à disposition les données des marégraphes permanents. Pour la zone des Pertuis Charentais, le port des Sables d'Olonne est équipé d'un marégraphe depuis juin 1999, la Pallice depuis 1997, l'île d'Aix depuis mars 2011, la Cotinière depuis septembre 2012, Royan depuis 2008 et Port Bloc depuis 2000.

Le Service de Prévision des Crues du département de la Charente Maritime possède des données marégraphiques permanentes et ponctuelles le long des côtes du Pertuis Charentais. L'ensemble de ces données n'est pas encore disponible sous forme numérique. Les données historiques du Chapus (1987, 2006-2007), de l'île d'Aix (1986-1987) et des données ponctuelles à la Cotinière (45 jours en 2005) sont disponibles et ont été utilisées dans cette thèse.

Afin de compléter les données, trois séries de mesures complémentaires à l'aide d'un capteur de pression ont été effectuées. La première campagne a été réalisée sur l'île d'Aix où le capteur de pression est permanent depuis mars 2011. La seconde a été faite sur la vasière de Brouage où une série de mesures sur trois mois a été effectuée. La dernière se situe au niveau de l'île de Ré, au phare des Baleineaux, et comporte une série de données sur trois mois également. Les capteurs sont identiques et de type marégraphe à pression de la marque RBR. Les données ont ensuite été ajustées avec les données de pression atmosphérique fournies par météo France.

Parmi ces sites marégraphiques, huit d'entre eux comportent un mois d'enregistrement du signal de marée (Tableau 4). Fort Boyard est un site de données historiques (de 1878 à 1907) dont les mesures restent incertaines. Les campagnes de mesures permettent une bonne estimation des ondes de marées mais, du fait de leur courte durée, ne permettent pas de séparer correctement les ondes entre elles. Les données sont souvent incomplètes ou trop courtes, ce qui les rend difficiles à traiter. Les exemples les plus flagrants étant la ville de Royan qui donne des résultats très discutables, c'est pourquoi ils n'ont pas été présentés ici, et l'île d'Aix qui présente des résultats sur la phase incorrectes pour les données Refmar. La raison de ces erreurs est une discontinuité trop importante dans les données, probablement due à des dysfonctionnements du marégraphe sur la durée ; il en résulte des données trop clairsemées qui ne peuvent être traitées au moment de l'analyse des données dans cette thèse. Le temps d'enregistrement des données est résumé dans le tableau suivant :

Station	Durée d'enregistrement (en jours)	Sources
St martin de Ré	29	SHOM
Pointe Aiguillon	35	SHOM
Cotinère	45	SHOM
Baleineaux	90	Chalumeau
Vasière Bouage	90	Chalumeau
Gatseau	91	SHOM
Chapus	355	SHOM
Ile d'Aix	> 1 an	Chalumeau
Sables d'Olonne	> 1 an	SHOM
Fort Boyard	> 1 an	SHOM
Verdon	> 1 an	SONEL
La Pallice	> 1 an	SONEL

Tableau 4 : Durée d'enregistrement des marégraphes et leur source. Les données marquées Chalumeau correspondent aux mesures effectués au cours de cette thèse

La durée d'enregistrement est un paramètre essentiel pour effectuer des analyses harmoniques fiables. Le principal problème vient du manque de marégraphes permanents dans les Pertuis Charentais. Il est alors difficile de séparer les ondes de marées lors de courtes mesures. Malheureusement, les séries marégraphiques longues sont une ressource rare (Gouriou 2012). La plupart des données sont difficiles d'accès ou non-numérisées, voire même de mauvaise qualité. Les données marégraphiques utilisées durant cette thèse sont résumées dans le tableau suivant :

Station name	Sable d'Olonne		Baleineaux		La Cotinière	
	Amplitude (m)	Phase (°)	Amplitude (m)	Phase (°)	Amplitude (m)	Phase (°)
O1	0,07	324	0,08	329	0,07	324
K1	0,06	72	0,08	84	0,07	73
N2	0,32	77	0,35	87	0,33	73
M2	1,55	97	1,62	97	1,55	93
S2	0,56	129	0,50	133	0,55	122
M4	0,15	4	0,16	5	0,14	343
M6	0,01	322	0,02	318	0,02	225
Station name	La Pallice		Ile d'Aix		Le chapus	
	Amplitude (m)	Phase (°)	Amplitude (m)	Phase (°)	Amplitude (m)	Phase (°)
O1	0,07	324	0,07	325	0,06	330
K1	0,07	74	0,07	73	0,05	67
N2	0,36	79	0,37	78	0,35	84
M2	1,74	98	1,80	98	1,72	102
S2	0,62	130	0,64	130	0,59	139
M4	0,25	8	0,26	7	0,22	23
M6	0,04	314	0,04	305	0,02	332

Tableau 5 : Amplitudes (en mètres) et phases (en degrés) des ondes principales de marée observées dans les Pertuis Charentais en temps universel plus une heure

Le courant

Le long des côtes et plus particulièrement le long des côtes françaises de l'océan Atlantique, ce sont les courants de marées qui ont le plus gros impact et une vitesse élevée. Dans la mer des Pertuis, trois zones ressortent : le Pertuis Breton, le Pertuis d'Antioche et la Baie de Marennes-Oléron.

Le Pertuis Breton a un apport en eaux marines à ses deux extrémités. Les courants de marées montantes et descendantes sont la base de la circulation, pourtant il reste des zones tourbillonnaires. On peut diviser le Pertuis en deux régimes : à l'Ouest, et ce jusqu'au deux tiers de la longueur de l'île de Ré, les courants s'alternent en gardant un axe parallèle au Pertuis, tandis qu'à l'Est, le flux se dirige vers le Coureau de la Pallice au jusant et vers la baie de l'Aiguillon au flot. Les échanges avec les autres parties de la mer des Pertuis sont assez limités, ce qui a pour effet des temps de résidence plutôt longs (85 jours). On aura des vitesses maximales de 0.75 à 1 m/s en vives eaux et de l'ordre de 1m/s dans le Coureau de la Pallice (Rostagno et al., 1999).

Le Pertuis d'Antioche est directement frappé par le flot océanique à l'ouest. Lorsque le flot s'engouffre dans les Pertuis il se sépare en deux courants, l'un ayant pour direction le Coureau de la Pallice et les côtes continentales en face, l'autre se dirigeant directement vers le sud en suivant les côtes de l'île d'Oléron. La vitesse des courants aura tendance à baisser le

long du Pertuis, avec au nord du rocher d'Antioche des courants variables de 1,1 m/s, puis 0.7 m/s au milieu des Pertuis et enfin 0.6 m/s en baie de la Rochelle (Rostagno et al., 1999).

La Baie de Marennes-Oléron est sujette à de forts courants dans la partie centrale ainsi qu'au sud du bassin. Avec sa morphologie particulière et ses deux extrémités communiquant avec l'océan, le régime de marée est plus complexe. Lors du flot les courants convergent vers le bout de la baie, tandis qu'au jusant les courants se séparent dans le sens inverse. En marée de vives eaux la pleine mer a lieu 40 minutes plus tôt dans le Pertuis de Maumusson qu'à l'île d'Aix. Ceci est provoqué par la diminution des fonds entre le Nord et le Sud de la baie qui entraîne un retard de l'onde de marée venant du Nord (Bertin, 2005). Alors que la marée est haute à la Rochelle, les courants de marée sortent déjà du Pertuis de Maumusson, ce qui a pour effet d'accélérer le début du jusant à Maumusson et créant ainsi une dominance du jusant sur le flot. Le flot venant du Pertuis d'Antioche traverse donc la baie pour ressortir par le Pertuis de Maumusson. Suivant les conditions de vent et de marée, le temps de chasse de la baie varie entre 5 à 15 jours (Stanisiere et al., 2008). Sur les estrans à l'est et ouest de la baie, les vitesses des courants diminuent. Les vitesses sont donc variables suivant la largeur de la passe dans la baie, variant entre 0,50 à 1,5 m/s et de 1,5 à 2 m/s dans le Pertuis de Maumusson (Bertin, 2005).

La figure en page suivante donne un aperçu général des courants de marée dans les Pertuis avec les vitesses de courants à mi-jusant et à mi-flot.

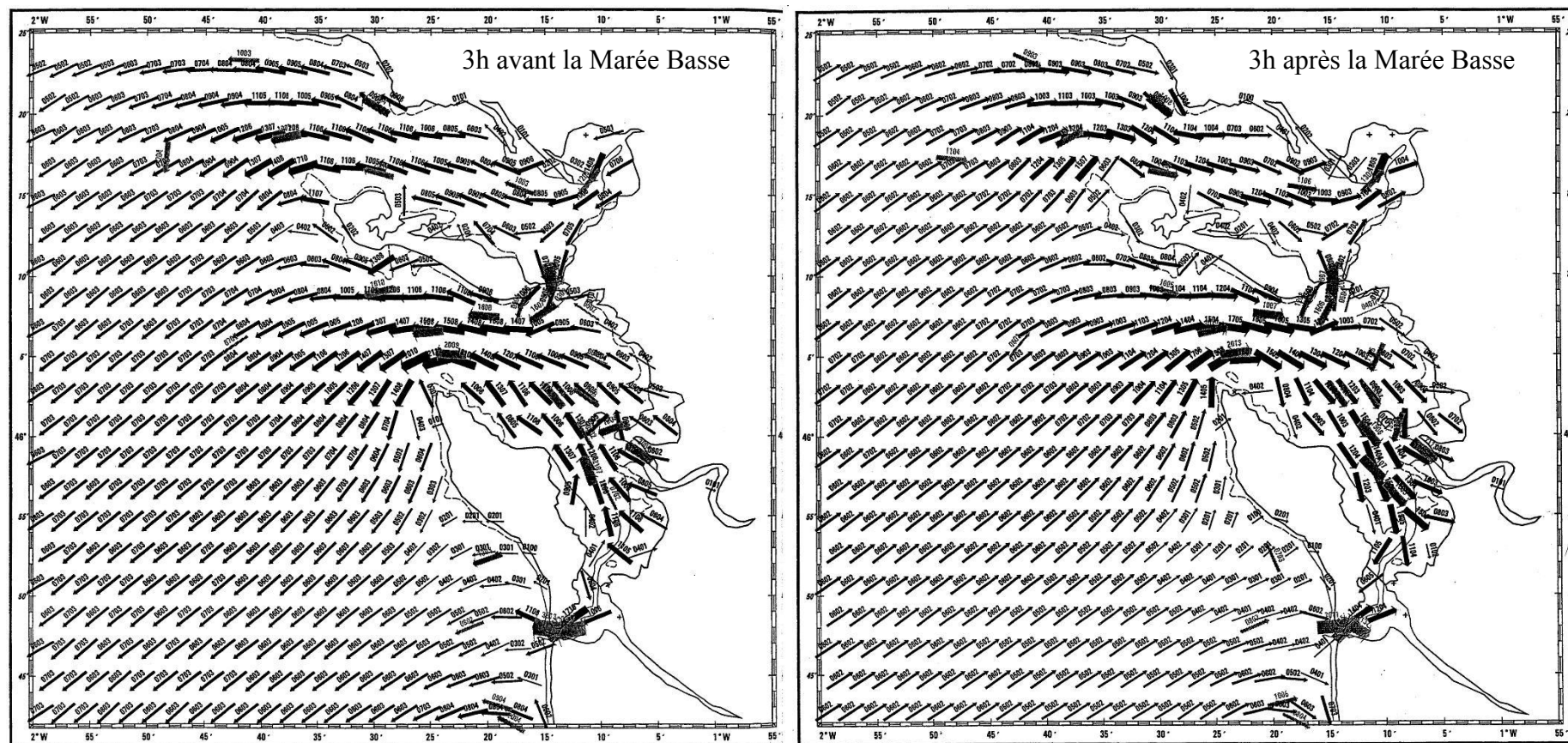
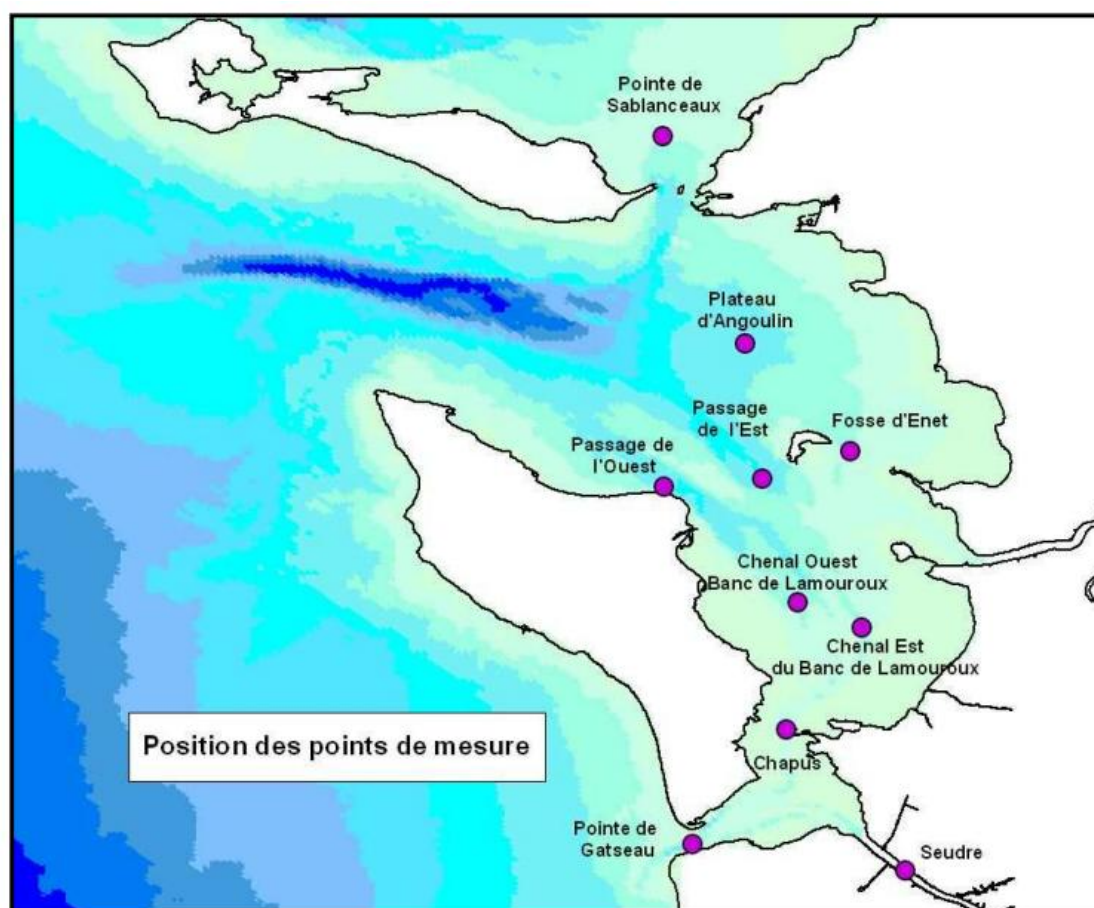


Figure 16 : Carte des Courants de marée dans les Pertuis Charentais. Résultats de modélisation numérique avec telemac 2D, vent Nul avec un coefficient de marée de 95 (Macur, 1999).

Mesures de courants

Nous avons utilisé durant cette thèse des vitesses de courants des Pertuis Charentais fournies aimablement par Jean-Yves Stanisère de l'Ifremer. Ces mesures ponctuelles, réalisées en 2004 (Stanisiere et al., 2008), s'étalent d'avril à novembre (Figure 17). Elles ont été réalisées à l'aide d'un courantomètre acoustique Doppler RDI 600kHz équipé d'un capteur de pression. L'instrument a mesuré toutes les cinq minutes la vitesse d'écoulement d'une colonne d'eau sur plusieurs couches d'épaisseur déterminée. Ces mesures permettent de comparer les résultats de la hauteur d'eau mais surtout les profils verticaux de la vitesse et de la direction du courant. Les vitesses de courants sont moyennées sur la colonne d'eau afin d'être comparables aux résultats d'un modèle 2D. L'ensemble de la campagne de mesures ADCP nous fourni un jeu de données très important. D'abord sur la durée, puisque chaque point comporte un minimum de trois semaines de mesures avec un enregistrement toutes les cinq minutes, mais aussi spatialement avec dix points de mesure.



Point	Date de pose	Date de levée	X EUR50	Y EUR50
Chenal_Ouest_Banc_Lamouroux	13/05/2004 15:06	27/05/2004 11:36	01°10,311' W	45°55,757' N
Passage_de_l_Est	27/05/2004 13:48	06/11/2004 13:48	01°11.527' W	45°59.956' N
Passage_de_l_Ouest	06/11/2004 15:50	30/06/2004 11:20	01°14.870' W	45°59.700' N
Chapus	30/06/2004 15:13	20/07/2004 11:03	01°10.692' W	45°51.466' N
Pointe_Gatseau	20/07/2004 13:43	28/07/2004 13:08	01°13.891' W	45°47.580' N
Fosse_d_Enet	28/07/2004 15:05	10/08/2004 14:50	01°08.538' W	46°00.900' N
Pointe_Sablanceaux	10/08/2004 17:08	07/09/2004 11:08	01°14.899' W	46°11.574' N
Plateau_Angoulin	07/09/2004 15:03	22/09/2004 12:08	01°12.116 W	46°04.539 N
Chenal_Est_Banc_Lamouroux	22/09/2004 16:54	21/10/2004 13:34	01°08.134 W	45°54.907 N
Seudre	21/10/2004 14:55	22/11/2004 14:45	01°06.673 W	45°46.704 N

Figure 17 : Dates et positions des mesures courantométriques avec ADCP dans les Pertuis Charentais (Stanisiere et al., 2006)

Capteur ADCP :

Un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) est un instrument de mesure basé sur le principe du sonar. Il permet de mesurer un profil de vitesses et de directions du courant. Le terme ADCP s'explique de par sa définition :

- Acoustic – Utilisation d'une onde sonore
- Doppler – Effet Doppler appliqué à la mesure de vitesse
- Current – Mesure de la vitesse de l'eau
- Profiler – Mesure d'un profil de vitesse, pas d'une vitesse ponctuelle

La vitesse de l'eau est mesurée à partir des particules en suspension dans la colonne d'eau, par l'effet Doppler. L'ADCP envoie des ondes ultra-sons qui sont réfléchies par les particules en suspension. Ces particules n'ont pas de mouvement propre et ne se déplacent qu'à cause du courant qui les emporte. Lorsque l'onde atteint les particules, elles réfléchissent l'onde sonore émise par l'ADCP. Dans notre cas, les capteurs ADCP nous ont permis de déterminer l'intensité et la direction des courants dans la colonne d'eau.

La houle et les vagues

La houle se forme dans le milieu de l'océan atlantique et varie selon les saisons. La houle océanique atteint le littoral et s'écrase sur les côtes ouest de l'île d'Oléron et de l'île de Ré qui protègent ainsi l'intérieur des Pertuis. A l'intérieure des Pertuis, l'anse de l'aiguillon et la Baie de Marennes-Oléron sont bien protégées.

Les houles ont une hauteur comprise entre 0 et 2.5m (86% des houles à Chassiron) et sont majoritairement orientées Nord-Ouest (37%) et Ouest (26%) avec une période de 8 à 12 secondes (Bellesort and Migniot, 1987).

Le vent

Le vent est un facteur ayant un impact important sur l'hydrodynamique, influençant les temps de résidence et le transport dans le Pertuis ainsi que la houle et les mers de vents. Il est l'objet de nombreuses mesures dans les Pertuis. Sur la Figure 18, qui est tirée de données Météo France sur la moyenne annuelle entre 1984 et 1994, on voit une augmentation de l'intensité des vents en avril et entre octobre et janvier.

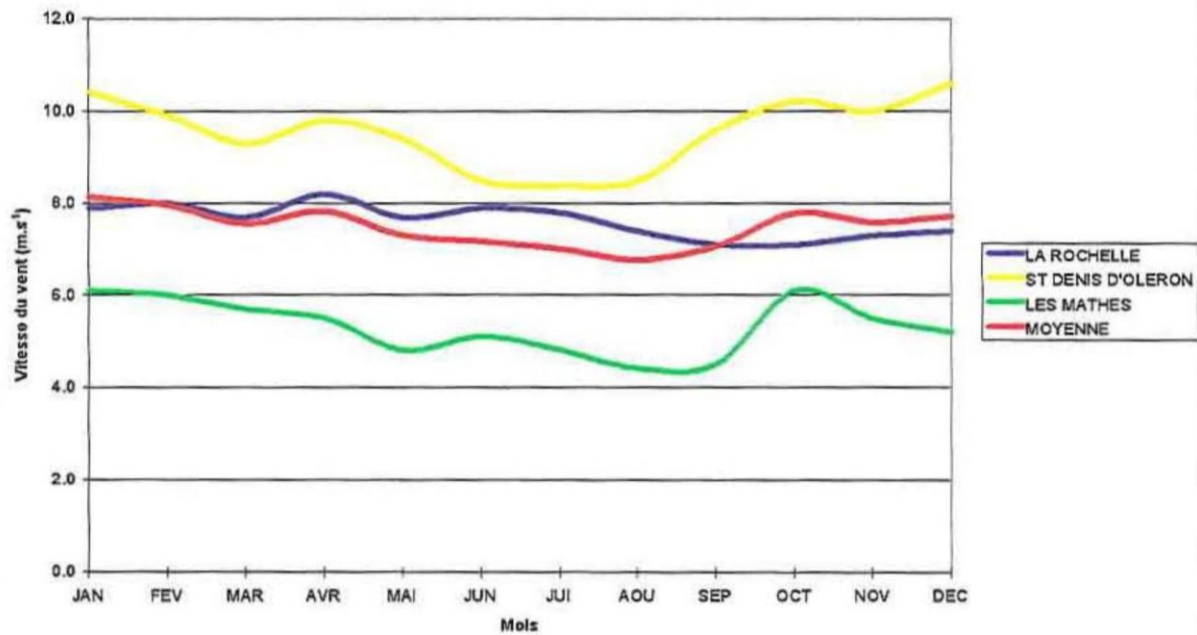


Figure 18 : Moyenne des vitesses de vent de 1984 à 1994 (Rostagno et al., 1999)

Le vent est orienté principalement ouest sur l'année, les vents Sud-Ouest à Nord-Ouest représentent plus de 50% des vents tandis que les vents d'Est à Nord-Est représentent 20%. Les vents d'Ouest sont les plus intenses avec une supériorité des vents Ouest-Sud-Ouest.

Temps de chasse, âge et temps de résidence dans les Pertuis Charentais

De nombreuses études ont été menées sur le temps de chasse dans les Pertuis Charentais. On peut diviser les Pertuis en trois zones et calculer le temps de résidence pour chaque zone (Figure 19): le Pertuis d'Antioche, le Pertuis Breton et la zone de la Baie de Marennes-Oléron.



Figure 19 : Les différentes régions des Pertuis Charentais utilisées pour le calcul des temps de résidence, avec de gauche à droite : Le Pertuis Breton, Le Pertuis d'Antioche et la Baie de Marennes-Oléron.

Les premières études menées dans les Pertuis Charentais ont posé le cadre hydrodynamique de la région. Dès le début des années soixante dix, les mesures de courants,

température et salinité de la Baie de Marennes-Oléron montrent une différence de vitesse entre les courants de fond et ceux de surface (généralement due à la bathymétrie). Il y a une circulation résiduelle entre le Pertuis d'Antioche et celui de Maumusson et des cellules de circulation dans les chenaux où les courants de flot et de jusant prévalent. De plus, la zone de Ronces-les-bains est moins accessible aux influences océaniques malgré la présence du Pertuis de Maumusson (Klingebiel et al. 1971, Klingebiel & Tesson 1974).

La Baie de Marennes-Oléron

La zone de Marennes-Oléron reste la plus étudiée du fait de son intérêt économique puisque l'ostréiculture y est omniprésente et reste une source de revenus majeure pour la région car elle est l'un des premiers bassins ostréicoles français avec Arcachon. Cette zone des Pertuis charentais est extrêmement étudiée du fait de cette activité, la qualité des eaux arrivant sur les zones ostréicoles est une préoccupation majeure des ostréiculteurs.

Bacher et al (1991) ont développé un modèle en boîtes de la Baie de Marennes-Oléron, en regroupant ses 13 zones, puis ils ont réalisé un couplage entre un modèle de production biologique et un modèle hydrodynamique incluant le transport particulaire. Pour mieux comprendre la circulation des masses d'eaux, ils ont utilisé un modèle courantologique 2d à banc découvrant et ont modélisé des courants résiduels. La carte des courants met en évidence deux tourbillons de sens contraire situés entre la Baie et le Pertuis d'Antioche, ainsi que la circulation nord-sud déjà évoquée.

Afin de comprendre la nature et l'ampleur des échanges entre l'océan et la Baie de Marennes-Oléron, Dechambenoy et al. (1977) ont schématisé et décrit les courants de marée et les écoulements résiduels à l'aide de la thermographie infrarouge aéroportée, couplée à des mesures en mer. Ils observent alors que la masse d'eau pénétrant la Baie par le Pertuis de Maumusson est très modeste par rapport à celle arrivant par le Pertuis d'Antioche. Ils notent aussi un courant marin longeant la cote Nord de l'île de Ré dans le Pertuis Breton qui s'évacue par le Coureau de La Pallice, ainsi qu'une circulation Nord/Sud dans la Baie de Marennes-Oléron entre le Pertuis d'Antioche et le Pertuis de Maumusson. Cette circulation nord-sud confirme les résultats obtenus lors d'une campagne de mesure sur la salinité, menée par Klingebiel et al (1971). Les mesures de salinité, relativement élevées (28.6 à 31.9) dans la baie, reflètent un faible apport d'eau douce. Le taux de salinité mesuré est aussi important le long de la côte Est de l'île d'Oléron (30.5 à 31.9), témoignage d'une grande influence océanique. A l'inverse, les mesures effectuées dans la zone de Ronces-les-Bains (29.2 à 30.6) montrent que le Pertuis de Maumusson est moins affecté par la mer que les autres Pertuis.

La thèse de Struski (2005) sur la modélisation des flux de matières dans la Baie de Marennes-Oléron montre le déplacement de la matière en suspension. Les résultats d'un modèle hydrodynamique 2D (SIAM2D) permettent de suivre les trajets de particules de maille en maille. Un code de calcul de trajectoire développé sous Matlab utilisant les résultats de simulation a permis d'établir des faisceaux de trajectoire dans la Baie de Marennes-Oléron (Figure 20). Les résultats ont conclu à un temps de chasse variant entre 4 et 10 jours, la circulation résiduelle jouant un rôle important dans le transport, et un temps de résidence variant d'une demi-journée à 15 jours selon l'origine des trajectoires. Les résultats des calculs

de trajectoire ainsi que les temps de résidence locaux ont montré que la bathymétrie de la baie influençait grandement le transport, créant ainsi « des temps de résidence faibles et hétérogènes spatialement », entre $\frac{1}{2}$ journée et 15 jours suivant le lieu observé (Figure 21). Ces conclusions rejoignent celles des travaux menés par l’Ifremer sur le temps de résidence dans la Baie de Marennes-Oléron, estimé de 5 à 15 jours suivant les conditions de marée et de vent (Thomas et al., 1999). Struski met en avant une asymétrie est/ouest de la baie répondant différemment aux phénomènes hydrodynamiques et une zonation est/ouest de la salinité influencée par le panache de la Charente.

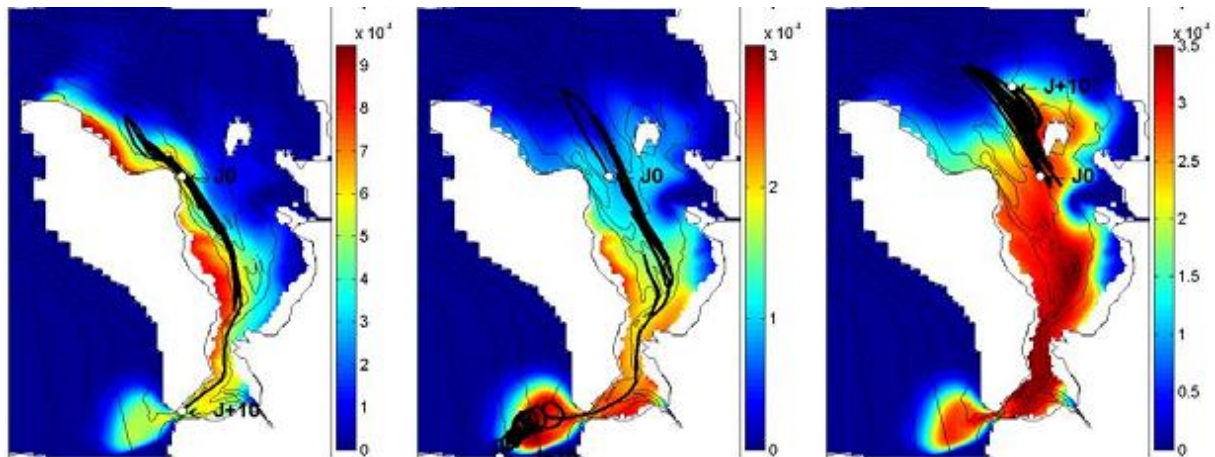


Figure 20 : Trajectoire de particules et dispersion du traceur. Exemples de résultats de simulations d’un traceur au bout de dix jours partant de j_0 jusqu’à $j+10$ et sa concentration (Struski, 2005)

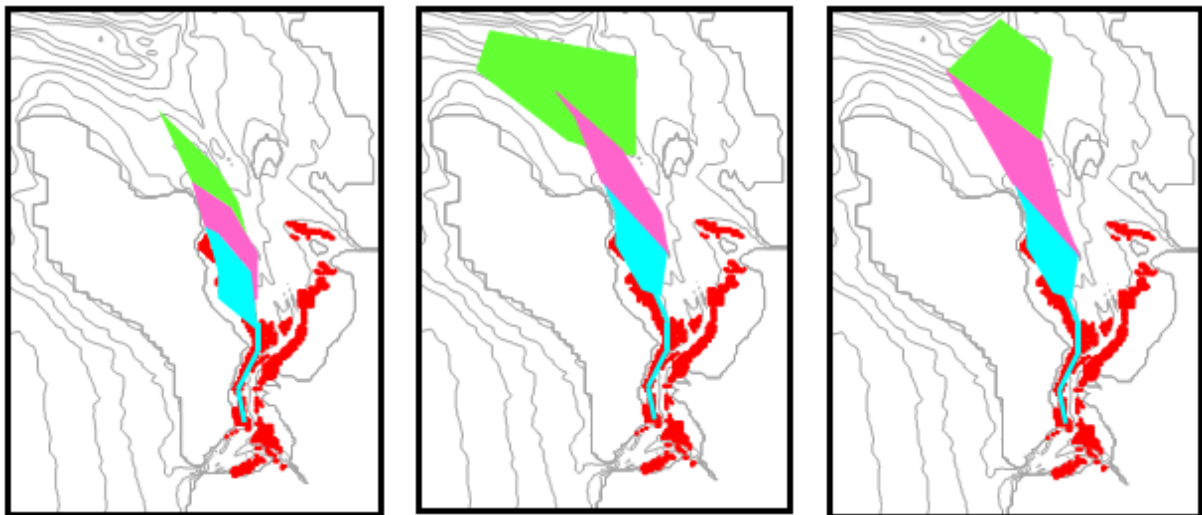


Figure 21 : Zone d’influence des masses d’eau selon leur âge – En bleu de J_0 à $J-2$; en rose de $J-2$ à $J-5$; en vert de $J-5$ à $J-10$ jours (Struski, 2005)

Le modèle hydrodynamique présente cependant des limites. Le test de sensibilité aux frottements est un paramètre à prendre en compte au vu de son influence sur les courants (effet d’avance ou de retard sur le signal de marée), en particulier dans une zone à petit fond (Nicolle & Karpytchev 2007). Le vent doit également être pris en compte dans les paramètres de calcul, dans la mesure où il influence la remise en suspension.

Une autre étude sur les mouvements des masses d'eau dans les Pertuis Charentais conduite par l'Ifremer quantifie les trois principaux facteurs dynamiques. En effet, suivant l'influence du vent et les débits des fleuves et marées, les temps de chasse peuvent varier.

Par exemple, par vent nul, le temps de chasse pour la Baie de Marennes-Oléron est estimé à 12 jours. Cependant il peut varier de 20 % selon le moment de la marée et les conditions de vent, l'impact des fleuves étant minime (Stanisiere et al., 2008).

Les Pertuis Breton et d'Antioche

Au sein des Pertuis Charentais, les Pertuis Breton et d'Antioche ont fait l'objet de peu d'études sur le temps de transport des masses d'eau. Stanisière et al. (2008) déterminent le temps de chasse des eaux du Pertuis Breton à 85 jours et 104 jours pour le Pertuis d'Antioche par vent nul. Une différence de 7 à 9 fois plus grande que la Baie de Marennes-Oléron. Une telle différence s'explique par la morphologie de la Baie de Marennes-Oléron qui a des surfaces découvrantes, comme les estrans, et un volume oscillant plus important. Le pourcentage de surfaces découvrantes est de 60% pour la Baie de Marennes-Oléron contre 12% et 20% pour le Pertuis D'Antioche et le Pertuis Breton, le volume oscillant est quand à lui de 75% contre respectivement 35% et 30% (Stanisiere et al., 2008). L'influence du vent est par contre très importante pour les Pertuis Breton et d'Antioche avec une variation du temps de chasse de 70% suivant les conditions de vent. La marée quant à elle participe au temps de chasse dans le Pertuis d'Antioche mais moins dans le Pertuis Breton (Stanisiere et al., 2008). Le vent reste donc le premier facteur dominant dans le calcul du temps de chasse des masses d'eau des Pertuis Charentais, mais il reste moins dominant dans la Baie de Marennes-Oléron. Cependant, les débits des fleuves ont peu d'influence sur l'hydrodynamique des Pertuis Charentais. On pourra dire que les temps de résidences des eaux semblent assez longs avec des échanges limités avec le reste du Pertuis (Rostagno et al., 1999).

La Gironde

Le panache de la Gironde est lui aussi un facteur impliqué dans l'hydrodynamisme local, puisqu'il influence l'apport de la matière passive dans les Pertuis Charentais. De nombreuses études ont été menées afin de comprendre la relation existant entre la Gironde et les Pertuis Charentais. Très tôt, les observations ont montré que les eaux de la Gironde, remplies de vase, sortent par l'embouchure du fleuve et pénètrent le Pertuis de Maumusson pour rejoindre la Baie de Marennes-Oléron où elles décantent (Rossignol, 2005). L'ensemble des travaux réalisés sur le panache du fleuve ont conclu à une connexion non permanente entre les Pertuis et l'estuaire (Fontugne and Jouanneau, 1987). Cependant, cette connexion reste dépendante de la marée, des conditions météorologiques et du débit de la Gironde. Le modèle 3D de Lazure et Jegou (1998) prend en compte les effets combinés de la marée, du vent, des apports fluviaux et les échanges thermiques océan/atmosphère, montre que cette connexion est liée au débit de la Gironde ainsi qu'aux vents (Lazure, 1998). Au début de l'hiver, les stratifications sont faibles avec de fortes crues, le panache du fleuve monte vers le Nord et longe le littoral. Cette tendance s'inverse au printemps et la progression vers le Nord

est stoppée puis détournée vers le large ou le Sud lorsque les débits faiblissent et que les vents deviennent nord-ouest.

Le modèle de Bacher (2000), réalisé grâce au Code Telemac2D, s'intéresse à la salinité sur un domaine s'étendant de la Gironde à l'île de Ré. Les simulations suivent différents scénarii avec la direction du vent, le temps de la marée et les débits de rivières différentes. Ces scénarii montrent l'importance du coefficient de marée sur la dilution des panaches et sur le temps de résidence dans le bassin ainsi que le rôle du vent sur les positions et les formes des panaches de la Gironde. Un autre modèle sous Telemac2D (Rossignol, 2004) a utilisé la diffusion du traceur passif et conservatif de la salinité pour quantifier la proportionnalité des eaux girondines dans les Pertuis en fonction du débit de la Gironde et du vent. Ses résultats montrent aussi que le panache de la Gironde rentre par le Pertuis d'Antioche et de Maumusson.

D'autres études consistant à suivre des métaux lourds, en particulier le cadmium, soulignent la connexion Pertuis-Gironde. Par des campagnes de mesures menées dans l'estuaire de la Gironde et son panache sur le plateau continental, dans la Baie de Marennes-Oléron et dans l'estuaire de la Charente, Boutier et al (2000) démontrent que l'apport en cadmium dissous de la Charente (60 kg/an) n'est pas suffisant pour expliquer la forte teneur en cadmium dans les produits ostréicoles. Ces mesures, corrélées à un modèle hydrodynamique 3D, montrent que le panache de la Gironde s'étend jusqu'au Pertuis d'Antioche et confirment que la Gironde est une source importante en cadmium pour la Baie de Marennes-Oléron.

Conclusion

La présentation de la zone d'étude met en évidence une région macro-tidale à forte influence océanique, où la marée domine et s'engouffre dans des zones plus abritées. Les sources bibliographiques décrivent de façon quantitative et qualitative les mécanismes hydrodynamiques des Pertuis Charentais. Au vu du nombre d'études menées par le passé, la cartographie des courants de marées et les conditions hydrodynamiques de la région sont particulièrement bien établies dans le détail. En revanche, les valeurs des temps de résidence qui découlent des conditions hydrodynamiques sont moins connues. La Baie de Marennes-Oléron reste la région la plus étudiée et peu d'études se sont arrêtées sur les Pertuis d'Antioche et Breton. Des calculs du temps de chasse dans ces zones existent mais n'ont pas été vérifiés. De plus, l'impact du vent, pourtant considéré comme le facteur dominant sur les temps de chasse, n'est pas pris en compte. Ces régions suscitent de plus un intérêt particulier, le temps de chasse et de renouvellement des eaux devant être critique pour la migration des méduses.

L'analyse harmonique du signal de marée est le point de départ de la calibration des modèles hydrodynamiques de marée. Les différentes sources de données marégraphiques trouvées permettent de calculer les ondes dominantes de marées pour les principales zones des

Pertuis Charentais, dont la Pallice. Cependant, certaines données marégraphiques disponibles souffrent d'enregistrements discontinus, rares, sans repères ou de durées trop courtes pour extraire convenablement les ondes de marées. Les harmoniques de marée précises sont nécessaires à la calibration des modèles de marée. Un des objectifs de cette thèse sera d'étoffer le corpus de données marégraphiques pour les Pertuis, en particulier pour l'entrée du Pertuis d'Antioche et pour la Baie de Marennes-Oléron.

Il ressort qu'une partie de ce travail de thèse sera consacrée à la collecte et l'analyse de données marégraphiques et de courants afin de calibrer puis de valider le modèle hydrodynamique. Il sera utilisé pour simuler le transport de traceurs passifs dans les Pertuis et déterminer leurs temps de résidence.

Chapitre II. Développement du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D

Les Pertuis Charentais et plus particulièrement la Baie de Marennes-Oléron sont soumis à des activités anthropiques variées. C'est le premier bassin Ostréicole de France avec une production de 45000 à 60000 tonnes d'huîtres par an (Soletchnik et al., 1999). La fréquentation touristique y est aussi très importante avec 35 millions de nuitées comptabilisées tout au long de l'année en 2009 (Saint-Béat, 2012).

La vasière de Brouage qui représente 30% de la zone découvrante du bassin de Marennes-Oléron suscite un intérêt considérable de la part des biologistes (Leguerrier et al., 2004). Les vasières des estrans sont soumises au régime des marées. A marée basse, des surfaces plus ou moins étendues émergent. Les durées des immersions sont plus ou moins longues suivant le coefficient de marée. La prédiction du temps d'immersion des estrans est cruciale concernant diverses problématiques biologiques, parmi lesquelles : le métabolisme des espèces benthiques, la photosynthèse des micro algues, le temps d'alimentation des oiseaux sur la vasière, la remise en suspension du biofilm, ou encore la disponibilité des ressources dans l'estran. De manière générale, toutes formes de vie situées sur les vasières intertidales sont régies par le rythme des marées et l'immersion de la vasière. La prévision exacte du temps de submersion est nécessaire pour mieux comprendre la vie des écosystèmes intertidaux.

L'objectif est de définir avec précision les temps de découverture des vasières intertidales. De nombreuses questions liées à l'activité d'un biofilm de diatomées sur les vasières intertidales font l'objet de plusieurs programmes de recherche, dont l'ANR VASIREMI qui étudie le rôle trophique des biofilms microbiens dans les vasières intertidales. Cette étude est ciblée sur la vasière de Brouage. La production primaire de la vasière de Brouage est principalement assurée par un biofilm constitué de micro-algues benthiques, appelées microphytobenthos, et de procaryotes. Au sein du microphytobenthos, la production des diatomées est directement liée aux mouvements océaniques. Le but est de réaliser un modèle numérique de marée à haute résolution permettant de comprendre les processus tidaux qui influencent le temps de recouvrement des vasières.

Modèle Hydrodynamique 2D

1. Stratégie de modélisation

Les Pertuis Charentais comportent des difficultés de modélisations hydrodynamiques : la bathymétrie est caractérisée par une mer peu profonde avec la présence de bancs intertidaux définis par les estrans vaseux qui sont émergés à marée basse puis submergés à marée haute.

Nous avons construit un modèle numérique de simulation de la marée et de courants dus au vent, fondé sur le logiciel Telemac. Telemac est basé sur la résolution des équations de Saint-Venant (Hervouet, 2001). Les points clefs de cette étude, qui sont le transport des méduses et la détermination du temps d'immersion des vasières intertidales, nécessitent l'utilisation d'une bathymétrie précise, d'une haute résolution du maillage sur les zones découvrantes et d'un coefficient de frottement sur le fond variable. Le modèle est validé par comparaison avec des données marégraphiques d'observations dans les Pertuis Charentais. Une nouvelle méthode basée sur l'utilisation des images satellites est développée dans cette thèse afin de calibrer le modèle plus précisément dans les eaux peu profondes. Il s'agit de la méthode du suivi des lignes d'eaux.

Nous présentons dans cette section le modèle numérique utilisé. Nous discutons ensuite de la validation des hauteurs d'eau et de courants obtenus à l'aide du modèle dans cette thèse. Enfin, nous verrons quelles sont les applications de ce modèle pour le calcul des temps d'immersions sur les vasières intertidales et pour le transport.

2. Equations de Navier-Stokes

Les océans sont soumis à des lois qui régissent le mouvement des océans, ce sont les lois de conservation :

- Conservation de la masse : équations de continuité
- Conservation de la quantité de mouvement : équations de Navier Stokes
- La densité de l'eau de mer est liée à la pression, la température et la salinité : équation d'état et des lois de la thermodynamique

Les équations de Navier-Stokes sont des équations différentielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides. Leurs noms proviennent de deux physiciens du XIXe siècle qui sont Claude Navier et George Stokes. Les équations de Navier-Stokes dérivent de la deuxième loi de Newton. En usage courant, comme pour la modélisation de la marée, on effectue des simplifications en considérant que le fluide est incompressible.

Pour un fluide de viscosité constante en milieu tournant, les équations de mouvement auront la forme suivante (Lefevre, 2000) :

Equation de continuité (ou équation de conservation de masse):

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (6)$$

Où :

- \mathbf{u} est la vitesse d'une particule d'eau
- ρ est la masse volumique de l'eau
- \mathbf{g} est la pesanteur
- p est la pression de l'eau
- $\boldsymbol{\Omega}$ est le vecteur de rotation de la terre (constant)

Nous nous intéressons ici à la marée et à la résolution de ces équations dans les océans. Il est possible de simplifier ces équations en considérant que l'eau est un fluide incompressible. Les équations vues précédemment se simplifient et deviennent (Gill, 1982; Lefevre, 2000):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nabla \Pi - \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_f \quad (8)$$

Où :

- \mathbf{u} est la vitesse d'une particule d'eau
- ρ est la masse volumique de l'eau qui est constante car considérée comme incompressible
- \mathbf{g} est la pesanteur supposée constante
- p est la pression de l'eau
- $\boldsymbol{\Omega}$ est le vecteur de rotation de la terre (constant)
- Π est le potentiel astronomique générateur des marées
- \mathbf{F}_f est la force de frottement due au fond

De plus dans le cas de la marée, deux hypothèses supplémentaires peuvent être ajoutées : le fluide est barotrope⁷ et la composante verticale de la vitesse est négligeable par rapport aux composantes horizontales. Avec ces deux approximations, on peut se placer dans l'hypothèse des ondes longues (Bars, 2010).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla[(H+\alpha)\mathbf{u}] = 0 \quad (9)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\mathbf{g}\nabla\alpha - 2\mathbf{\Omega}\wedge\mathbf{u} + \nabla\Pi - \frac{1}{\rho}\mathbf{F} \quad (10)$$

Où :

- H est la profondeur constante d'un océan au point considéré ;
- α est l'élévation de surface due à la marée ($\alpha(\lambda, \Phi, t)$), λ : longitude, Φ : latitude, t : temps
- $\mathbf{\Omega}$ vitesse de la rotation de la terre
- \mathbf{u} ($u_x(x, y, 0, t)$, $u_y(x, y, 0, t)$, 0)

Les équations linéarisées de la marée prennent forme au large où :

- Les courants de marées et leurs dérivées spatiales sont faibles :

$$\|\mathbf{u}\nabla\mathbf{u}\| \ll \|\mathbf{u}\|, \text{ donc } \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla\mathbf{u} \approx \frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}$$

- Loin des côtes, α est petit devant H :

$$H + \alpha \approx H, \text{ donc } \nabla[(H + \alpha)\mathbf{u}] \approx H\nabla\mathbf{u}$$

- Les frottements sont négligeables sur la colonne d'eau au large.

On obtient les équations linéarisées de la marée (Lefevre, 2000) :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + H\nabla\mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{g}\nabla\alpha - 2\mathbf{\Omega}\wedge\mathbf{u} + \nabla\Pi \quad (12)$$

⁷ Barotrope : se dit d'un fluide dans lequel les surfaces de pressions constantes (isobares) sont parallèles à celles de densités constantes, par opposition à un fluide barocline. (Simon and Gonella, 2007)

3. Présentation du modèle

Le modèle hydrodynamique est basé sur le code Telemac 2-D et Telemac 3-D. Le modèle 3D sera présenté à la fin du chapitre. Le logiciel Telemac 2-D résout les équations de Barré de Saint-Venant. Ce sont les équations de Navier-Stokes intégrées sur la verticale en appliquant l'hypothèse que la vitesse horizontale est quasiment uniforme sur la verticale. Le modèle est basé sur la méthode des éléments finis qui résout ces équations hydrodynamiques en milieu côtier à chaque point du maillage. Les principaux résultats fournis sont la hauteur d'eau et les vitesses moyennes sur la verticale (Hervouet, 2001, 2003)

- Continuité (l'eau de mer est considérée comme un fluide incompressible):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \cdot \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (13)$$

- Dynamique selon x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h \nu_t \cdot \vec{\nabla} u) \quad (14)$$

- Dynamique selon y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h \nu_t \cdot \vec{\nabla} v) \quad (15)$$

Où :

- h est la hauteur d'eau (m)
- $\vec{u} = (u, v)$ est le vecteur de la vitesse moyenné sur la verticale (m/s)
- div est l'opérateur divergence
- S_h est le terme source ou puits du fluide (m/s)
- $\vec{\nabla}$ est l'opérateur vectoriel gradient
- Z est la cote de la surface libre (m)
- S_x et S_y - l'accélération de Coriolis, le terme de frottement sur le fond, les termes sources ou puits d'une quantité de mouvement dans le domaine
- ν_t est le coefficient de diffusion des vitesses (m²/s)

Ces équations sont traitées par différentes étapes en utilisant la méthode des pas fractionnaires. Premièrement, les termes de convections qui représentent des valeurs physiques telles que h , u , v et T (les traceurs passifs) sont traités. Ensuite, les équations de propagations-diffusions des termes sources qui sont résolues par la technique des éléments

finis avec la formulation variationnelle (Hervouet, 2003). Le domaine est couvert par un maillage non structuré composé de mailles triangulaires.

4. Modélisation du transport

Le système de modélisation Telemac2D (Hervouet, 2001) a été utilisé pour modéliser la marée dans le chapitre III ; il est de nouveau utilisé pour estimer le transport de particules dans les Pertuis Charentais.

Telemac2D permet également de résoudre l'équation du transport de la matière ainsi que les variations de température ou de salinité : c'est l'équation d'advection/diffusion et conservation du traceur.

- Conservation du traceur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h \nu_T \cdot \vec{\nabla} T) \quad (16)$$

Où :

- T est la concentration du traceur (g/l)
- S_T est le terme source du traceur (g/l/s)
- ν_T est le coefficient de diffusion du traceur (m²/s)

En dimension 3, avant la moyenne sur la verticale, l'équation du traceur sous sa forme conservative est :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \text{div}(\rho T \vec{U} + \vec{q}) = F_{source} \quad (17)$$

F_{source} est le niveau de création et \vec{q} est le flux dû à la diffusion moléculaire ou turbulence de la forme :

$$\vec{q} = -\rho \nu_T \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (18)$$

La moyenne sur la verticale étant déjà faite pour obtenir les équations de Saint-Venant, cela nous donne l'équation suivante pour la conservation du traceur en 2 dimensions :

$$\frac{\partial}{\partial t} (hT) + \text{div}(hT \cdot \vec{u}) - \text{div}(h \nu_T \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)) = T_{sce} S_{ce} \quad (19)$$

T_{sce} est la teneur originale du traceur, dépendante pour l'unité du traceur utilisé et définie par l'utilisateur dans le modèle. S_{ce} est l'origine de l'écoulement en m/s associée au terme Q_{se} qui est le débit d'écoulement en m³/s (Hervouet, 2003).

5. Marée en eaux peu profondes

Le potentiel générateur de la marée est la somme de composantes sinusoïdales élémentaires à un lieu donné. Jusqu'à maintenant, nous avons considéré uniquement les ondes de marée astronomiques générées par le potentiel des astres. Pourtant, dans l'analyse du spectre de la marée, nous avons vu que de nouvelles ondes apparaissent. En effet, lorsque nous sommes en zones côtières, des ondes non-linéaires apparaissent. Ces ondes visibles sur le spectre de la marée ont des fréquences supérieures aux ondes dites astronomiques. On ne peut pas négliger ces termes non-linéaires qui influencent la hauteur de la colonne d'eau dans des milieux peu profonds. L'introduction d'un coefficient de frottement est obligatoire dans la modélisation. Cette force de frottement F_f est donnée par:

$$F_f = \frac{C_f}{h} \|\mathbf{u}\| \mathbf{u} \quad (20)$$

Où :

- h est la profondeur d'eau instantanée de la colonne d'eau du fond à la surface
- \mathbf{u} est la vitesse horizontale
- C_d est le coefficient de frottement sans dimension. Il est lié au coefficient de Chézy par la formule suivante :

$$C_d = \frac{2g}{C^2} \quad (21)$$

Où g est l'accélération de pesanteur et C est le coefficient de frottement Chézy.

Le coefficient de frottement est déterminé empiriquement ; nous verrons plus tard dans cette thèse qu'il joue un rôle important dans la propagation des marées dans les Pertuis Charentais.

En ajoutant ce coefficient de frottement aux équations des ondes longues de la marée, on obtient les équations des marées littorales :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla[(H+\alpha)\mathbf{u}] = 0 \quad (22)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -g\nabla\alpha - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nabla\Pi - \frac{C_f}{\rho(H+\alpha)} \|\mathbf{u}\| \mathbf{u} \quad (23)$$

Où :

- α est l'élévation de surface due à la marée ($\alpha(\lambda, \Phi, t)$), λ : longitude, Φ : latitude, t : temps
- \mathbf{u} ($u_x(x, y, 0, t)$, $u_y(x, y, 0, t)$, 0)

Méthodes et données

L'approche adoptée dans ce travail est, dans un premier temps, la construction d'un modèle numérique de marée en deux dimensions qui reproduit la marée de manière satisfaisante sur l'ensemble des Pertuis Charentais puis dans un deuxième temps une application au transport. Les facteurs déterminant la précision d'un modèle sont :

- La bathymétrie
- Le forçage, incluant la marée, le vent et le débit des fleuves
- Les données *in situ* nécessaires au contrôle des résultats de modélisation

1. Données Bathymétriques

Un jeu de données bathymétriques précises et fiables est fondamental lors de la phase de construction du modèle.

Acquisition des données :

Les données bathymétriques collectées proviennent de différentes sources (Figure 22) :

- Les données bathymétriques anciennes du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) fournissent une bathymétrie provenant d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) datant des années 1960. La résolution de ce MNT est de 50 mètres à 95% en horizontale et de 30 centimètres pour la verticale jusqu'à 30 mètres, ensuite on rajoute 1% de la profondeur au-delà de 30 mètres pour la précision verticale.
- Des données récentes provenant du SHOM et du Service Maritime de la Direction Départementale de l'Équipement 17 ont été collectées entre 1959 et 1983 dans les zones de faible mobilité sédimentaire et entre 1994 et 2003 dans les zones de forte mobilité sédimentaire, ainsi que dans le chenal de navigation du port de commerce et d'industrie de La Rochelle à l'aide d'un sondeur mono-faisceau (Poirier, 2010).

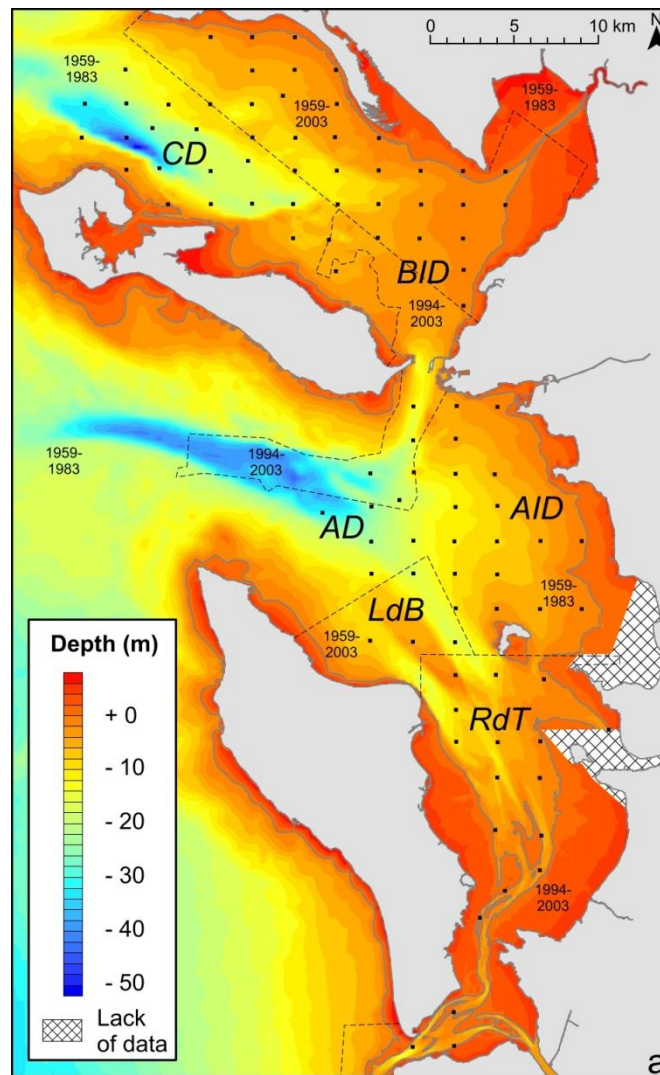


Figure 22 : Carte des données bathymétriques récentes des Pertuis Charentais (Weber et al., 2004). Les intervalles de temps indiqués sur la carte correspondent aux dates d'acquisitions des données. FC: Fosse de Chevarache, FA: Fosse d'Antioche, BID: Domaine Interne [du Pertuis] Breton, AID: Domaine Interne [du Pertuis] d'Antioche, LdB: Longe de Boyard, RdT: Rade des Trousses) (Poirier, 2010).

Les données Litto3D de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) sont une base de données altimétriques continues Terre-Mer (Figure 23). Les levés bathymétriques sont réalisés par les technologies LiDAR bathymétriques ou sondeurs multifaisceaux. Le LiDAR bathymétrique ne peut pénétrer la mer que sous certaines conditions de clarté de l'eau. Dans le cas des Pertuis, l'emprise des données LiDAR se limite aux estrans découvrants. L'acquisition Litto3D est réalisée pour fournir au minimum un point par 25 m². Des images aériennes sont acquises simultanément aux données LiDAR. Les précisions à 95% sont de 2,80 en planimétrie et 50 centimètres en altimétrie (IGN, 2012).

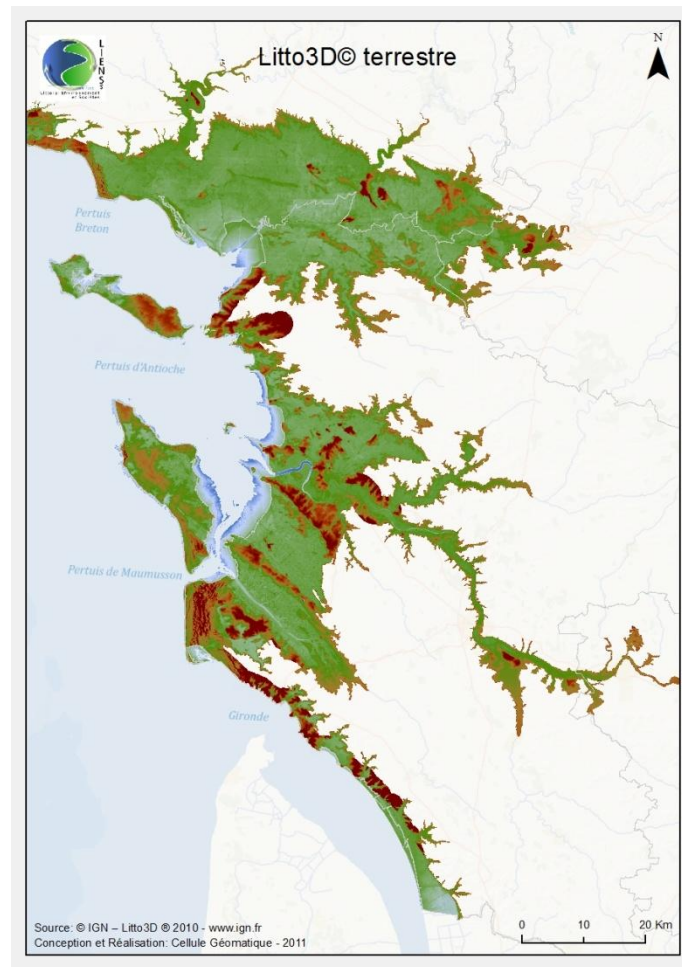


Figure 23 : Emprise des données Litto3D incluant les données topographiques ainsi que les données bathymétriques sur les estrans (Données IGN).

Le trait de côte provient de l'IGN et englobe l'ensemble du littoral français. Il prend en compte les îles de Ré et d'Oléron, ainsi que l'île d'Aix.

Harmonisation des données :

Les données bathymétriques et le trait de côte ont été géoréférencés à l'aide du système d'information géographique ArcGIS. L'ensemble de ces données a été replacé dans le même système géodésique. Deux projections ont été calculées et les premières coordonnées sont en Lambert II étendu. Ce système de projection n'est officiellement plus en vigueur mais le nombre de données basées sur ce système de projection justifie ce choix lors de manipulation de données. Le second choix s'est basé sur le WGS84, qui est en vigueur officiellement. De plus, les coordonnées WGS84 sont plus facilement convertibles pour la projection de Mercator utilisée par Telemac. Cette projection a été utilisée par exemple lors des comparaisons des images satellites avec le modèle.

Après avoir converti les données bathymétriques en une projection commune, elles ont été interpolées afin de générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sur ArcGIS. Deux méthodes d'interpolations ont été retenues : la méthode classique du Krigeage (Bertin et al.,

2005) et la méthode Topo to Raster (Childs, 2004). La première est adaptée aux données réparties de façon irrégulière dans l'espace, comme c'est le cas pour les données bathymétriques qui ont tendance à être plus denses au niveau des chenaux et plus éparées dans les hauts fonds. La seconde méthode d'interpolation impose des contraintes qui assurent la création d'un MNT viable pour le calcul de modèles hydrodynamiques en essayant de maintenir une certaine fluidité des surfaces. Elle utilise une technique d'interpolation itérative par différences finies. Le maillage du modèle a été ensuite réalisé afin de pouvoir répondre au mieux à la bathymétrie particulière et variable en espace des Pertuis Charentais.

2. Résolution par éléments finis

Principe

Différentes méthodes de calcul sont appliquées dans les modèles numériques existants. Deux tendances ressortent : la résolution par éléments finis et la résolution par différences finies. Ces techniques ont été longuement étudiées et comparées dans la littérature (Simpson & Clement 2003, Jones & Davies 2005, Hall & Davies 2005). Une tendance générale de l'approche par maillage en éléments finis est observée dans la modélisation en océanographie côtière, ce qui est le cas avec Telemac.

Les maillages en éléments finis ont l'avantage de pouvoir être affinés dans les zones côtières où les phénomènes de non-linéarité des processus hydrodynamiques apparaissent, ce que est plus difficile avec les modèles à discrétisation en différences finies et à grilles régulières. De plus, le phénomène «de marches d'escaliers » qui apparait dans les maillages en différences finies le long du trait de côte est supprimé, évitant la création de vortex ou autres phénomènes résiduels tidaux erronés (Hearn, 2008).

La qualité des résultats obtenus avec un modèle en éléments finis est directement liée à deux paramètres (Legrand et al., 2007):

- Les bonnes propriétés géométriques des éléments générés. Ce paramètre permet un bon conditionnement dans la résolution numérique des éléments finis.
- Les critères de raffinement des mailles. Ceci permet de prendre en compte les différents processus hydrodynamiques générés par la variation de reliefs de la bathymétrie.

La stratégie de raffinement des mailles est donc très importante compte tenue de la bathymétrie particulière des Pertuis Charentais et de ses estrans. Les avantages des éléments finis non-structurés nous permettront ici d'améliorer la précision des résultats en eaux peu profondes.

Maillage du domaine

Les différents maillages ont été réalisés à l'aide du logiciel Matisse. Plusieurs maillages ont été créés pour tester la sensibilité du modèle aux différentes stratégies et critères utilisés dans la génération du maillage. Nous décrirons ici comment nous avons obtenu le maillage raffiné de la Baie de Marennes-Oléron.

Nicolle (2006) a étudié la sensibilité de la résolution du maillage et son impact sur les résultats du modèle dans les Pertuis Charentais. Par exemple, un modèle comportant moins de 2300 nœuds ne suffit pas à rendre compte de la complexité des Pertuis lorsque l'on regarde les écarts entre le niveau de la mer observé et celui prédit par le modèle. Par contre, la différence entre un maillage de 3500 nœuds et 9000 nœuds affecte peu les harmoniques dominantes de marées avec une erreur globale qui diminue de 0.1 centimètre seulement. Un premier maillage « général » a été généré en prenant en compte la bathymétrie et en n'excédant pas 5000 nœuds. Ce premier maillage permet une bonne estimation des harmoniques en dehors des Pertuis ainsi qu'à la Pallice, mais ne garantit pas de résultats assez précis dans les parties sensibles, telle que la Baie de Marennes-Oléron. Il nécessite une deuxième étape de construction.

Par la suite, le maillage a été resserré dans les zones peu profondes et dans la côte, afin d'avoir une bonne précision et pour pouvoir tenir compte des effets de frottement sur le fond ainsi que les temps de découverture sur les estrans. Le maillage a été réalisé grâce à un algorithme déterminant la taille des mailles suivant la profondeur. Le critère sélectionné pour la Baie de Marennes-Oléron est en fonction de la bathymétrie de telle sorte que la distance entre deux nœuds et le rapport $\sqrt{(g * H)}$ soient constants (Jones and Davies, 2005). Cette méthode permet d'affiner la partie du domaine que l'on souhaite étudier sans alourdir le temps de calcul. Le maillage présenté (Figure 24) comporte 45117 éléments et 23424 nœuds, avec un domaine s'étendant sur 140 kilomètres de large et 200 kilomètres de long. La largeur des mailles varie de 3 kilomètres le long de la frontière ouverte à moins de 50 mètres à l'intérieur de la baie.

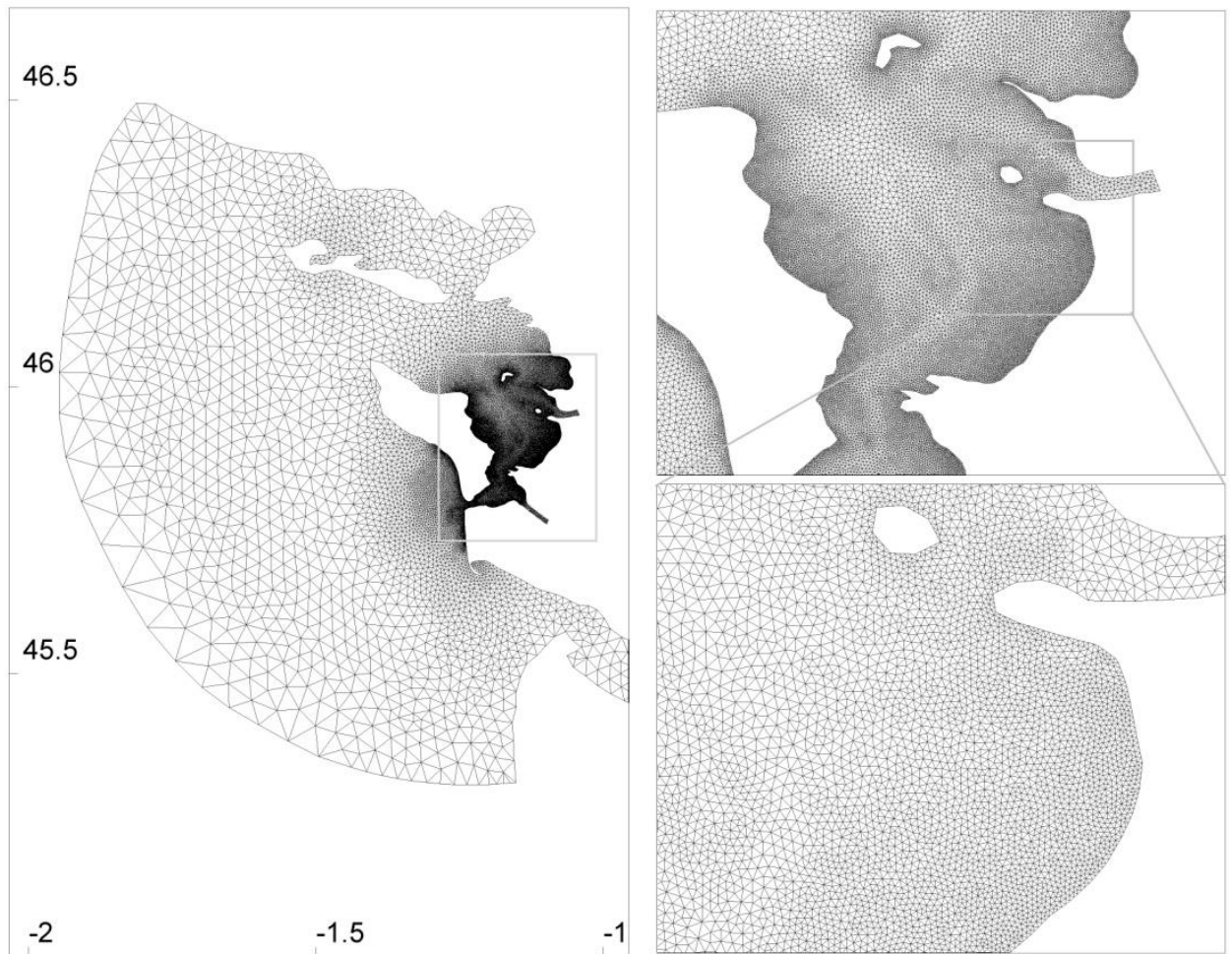


Figure 24 : Maillage raffiné de la Baie de Marenne- Oléron

3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites représentent l'ensemble des frontières du modèle numérique (Figure 25). Elles peuvent être de différents aspects :

- Les côtes et le contour des îles : elles sont représentées par des frontières solides où le glissement est parfait et les vitesses (u , v) sont nulles. L'eau ne peut pas traverser la frontière qui est considérée comme imperméable. La limite est définie par le trait de côte fourni par l'IGN.
- Les fleuves : la Charente, la Seudre et la Gironde sont représentés par des frontières ouvertes où l'on impose des valeurs de débits moyens.
- L'océan : les conditions limites du côté océan sont représentées par une valeur de hauteur d'eau imposée par la méthode de Thompson (Hervouet, 2003). Ce forçage océanique comprend les phases et amplitudes des principales constantes harmoniques de marées. Ces données ont été extraites à l'aide de la solution FES2010 (Finite Element Solution) développée par le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et

Océanographie Spatiales (LEGOS ; <http://www.legos.obs-mip.fr/>). Les cartes de marées FES2010 sont issues d'un modèle hydrodynamique global avec une résolution de $1/60^\circ$ de degré incluant 47 composantes tidales.

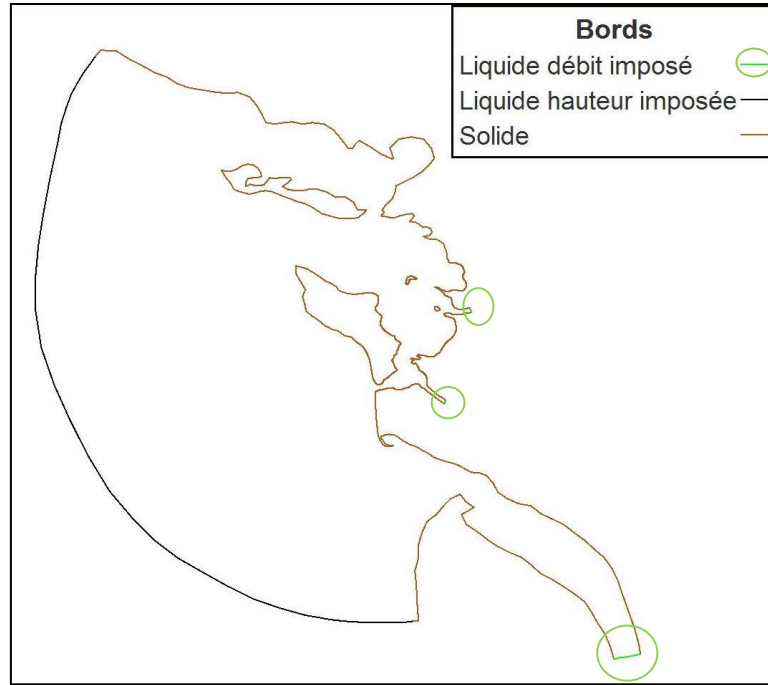


Figure 25: Conditions limites du modèle hydrodynamique, avec en marron les frontières solides, en noir la frontière liquide avec hauteur d'eau imposée et en vert les frontières liquides avec débit imposé.

Au total, le forçage sur la frontière ouverte totalise 16 composantes tidales : M2, S2, N2, M4, K2, MN4, MS4, O1, NU2, 2N2, MU2, K1, M6, L2, 2MS6, T2. Les hauteurs d'eau sont ensuite déterminées pour chaque instant du temps selon la formule de la décomposition en série d'harmoniques selon la formule de Doodson (Doodson, 1921; Simon and Gonella, 2007) :

$$h(t) = Z_0 + \sum_{i=0}^n A_i \cos(\theta_i t - \varphi_i) \quad (24)$$

Où :

- $h(t)$ est la hauteur d'eau à l' instant t
- A_i est l'amplitude de l'onde i , incluant la correction nodale
- φ_i est la phase de l'onde i
- Z_0 est le niveau moyen autour duquel oscille le niveau de l'eau
- θ_i est l'argument astronomique de l'onde i et s'exprime selon l'équation suivante (Doodson, 1921; Simon and Gonella, 2007):

$$\theta_i = 15jt + n_1s + n_2h + n_3p + n_4N' + n_5p_1 + n_6D \quad (25)$$

Avec :

- t est le temps solaire moyen local exprimé en heures décimales
- j est l'indice de l'onde. L'indice change suivant le type d'onde : $j = 0$ pour les ondes annuelles ; $j = 1$ pour les ondes diurnes et $j = 2$ pour les ondes semi-diurnes.
- $n1, n2, n3, n4, n5$ = nombres de Doodson (coefficient constant entier)
 $n6 = 0$ ou 1 ou -1 pour que le terme correspondant du potentiel soit de la forme $G \cos(\omega_i)$ avec $G > 0$.

Les paramètres suivants, exprimés en degrés, sont les paramètres astronomiques rapportés à l'instant origine (01/01/1980 à 00h00 ; Temps Universel) :

- s = longitude moyenne de la Lune
 $s = 78.16^\circ + 13.17639673T$
- h = longitude moyenne du Soleil
 $h = 279.82^\circ + 0.98564734T$
- p = longitude du périhélie de la Lune
 $p = 349.50^\circ + 0.11140408T$
- N = longitude du nœud ascendant de la Lune. $N' = -N$
 $N' = 208.10^\circ + 0.05295392T$
- pI = longitude du périhélie du Soleil
 $pI = 283.6^\circ + 0.000047069T$
- $D = 90^\circ$

On détermine T par la formule suivante :

$$T = E \left[30.6001 \left(1 + M + 12. E \left[\frac{1}{M+1} + 0.7 \right] \right) \right] + E \left[365.25 \left(a - E \left[\frac{1}{M+1} + 0.7 \right] \right) \right] + J + \frac{t}{24} - 723258$$

Où : (26)

- $E [\]$ signifie partie entière
- a est l'année
- M est le mois de l'année compté de 1 à 12
- J est le jour dans le mois de 1 à 31
- t est l'heure

Par exemple on aura $T = 10958$, pour une date de simulation commençant le 1^{er} janvier 2010.

Trois fleuves se déversent dans les pertuis charentais (Figure 25), les débits ont été imposés selon les valeurs définies dans le chapitre I. Les débits imposés sont de $76 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la Charente, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la Seudre et $900 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la Gironde. Ces valeurs sont constantes sur l'ensemble des simulations.

4. Coefficient de frottement

Les Pertuis Charentais se trouvent en eaux peu profondes où le frottement est important, régit par les équations des marées littorales. Il est modélisé à l'aide d'un modèle barotrope à deux dimensions basé sur les équations de Saint Venant pour les eaux peu profondes (Hervouet, 2001; Proudman, 1953) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(H\mathbf{u}) = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla\mathbf{u} + \mathbf{f}\wedge\mathbf{u} = -g\nabla\eta - \frac{C_d|\mathbf{u}|\mathbf{u}}{2H} + \nu\Delta\mathbf{u} \quad (28)$$

Où

- ρ est la masse volumique du liquide exprimé en kg/m^3
- C_d est le coefficient de frottement, sans dimension.
- \mathbf{u} est la vitesse de l'écoulement, moyennée sur la verticale en m/s
- \mathbf{f} est l'accélération de Coriolis

L'ajustement du coefficient de friction est une étape importante de la modélisation. Les résultats de test sur le plateau continental conseillent l'utilisation d'un coefficient compris entre 0.0023 et 0.0026 pour C_d (Pingree and Griffiths, 1987; Pingree, 1983). De récentes études menées par Bertin (Bertin et al., 2012) sur le plateau continental et les Pertuis Charentais préconisent un coefficient de frottement de 0.0025.

Le coefficient de frottement C_d peut être remplacé par d'autres types de coefficients. Il existe dans Telemac plusieurs options pour définir le type de frottement : pas de frottement sur le fond, la Loi de Haaland, la formule de Chézy, la formule de Strickler, la loi de Manning et la loi de Nikuradse (Hervouet, 2001). Les coefficients de frottement Chézy et Manning sont les plus répandus dans la modélisation. Les zones fluviales sont couramment modélisées selon l'approche de Manning. Telemac est un modèle dédié à la modélisation des écoulements à surface libre, son approche hydrodynamique est plus proche de celle de Chézy. Cependant, les deux approches restent équivalentes (Bars, 2010). Dans un modèle qui utilise le coefficient de Chézy (C en $\text{m}^{1/2}.\text{sec}^{-1}$), les termes C_d et C sont liés par la formule suivante :

$$C = \sqrt{\frac{2g}{C_d}} \quad (29)$$

Lorsque nous ajoutons la formulation de Chézy pour la force de frottement sur le fond, nous obtenons la formule de Chézy suivante :

$$\vec{F} = \frac{1}{\cos(\beta)} \frac{g}{hC^2} |\mathbf{u}|\vec{\mathbf{u}} \quad (30)$$

Avec β l'angle de la plus grande pente au fond.

Cette formule est à inclure dans le modèle et à rajouter aux équations de la quantité de mouvements sous forme non conservative. Selon l'axe x et y , on obtient l'équation suivante:

$$F_x = \frac{1}{\cos(\beta)} \frac{g}{hC^2} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (31) \quad F_y = \frac{1}{\cos(\beta)} \frac{g}{hC^2} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (32)$$

Avec u et v les composantes qui suivent respectivement l'axe des x et l'axe des y , de la vitesse dans les équations de Saint-Venant.

L'ajustement du coefficient de frottement se complique lors de l'ajout du terme quadratique u^2 dans les équations de Saint-Venant, le modèle de marée produisant une réponse non-linéaire aux changements de valeur du terme.

En plus de la vitesse d'écoulement, la contrainte de frottement sur le fond est aussi sensible à la rugosité de la nature du fond (Soulsby, 1997). Les vases et les sables fins sont présents sous des régimes hydrodynamiques lisses ou transitoires, et les sables grossiers et graviers sous des régimes rugueux. De manière générale, les écoulements sur du sable sont traités dans le cas d'un écoulement rugueux. La rugosité du fond est une valeur qui peut être représentée par z_0 , à ne pas confondre avec le niveau moyen utilisé précédemment. Elle dépend de la taille du grain moyen, représentée par d_{50} , en relation avec l'expression :

$$z_0 = \frac{d_{50}}{12} \quad (33)$$

La relation entre le type de fond marin et la valeur de moyenne de Z_0 ainsi que du coefficient de frottement Chézy moyen sont répertoriés dans le tableau suivant (Soulsby, 1983) :

Type de fond	z_0 (mm)	C_d	C
Sable (avec rides)	6	0.0061	57
Graviers	3	0.0047	65
Vase / Sable	0.7	0.0030	81
Sable (sans rides)	0.4	0.0026	87
Sable / Calcaire	0.3	0.0024	90
Sable / Graviers	0.3	0.0024	90
Vase / Sable / Graviers	0.3	0.0024	90
Vase	0.2	0.0022	94
Silt / Sable	0.05	0.0016	111

Tableau 6 : moyennes de Z_0 (en mm), C_d et C (en $m^{1/2}.sec^{-1}$) pour différents types de fond (Soulsby, 1983)

Ces valeurs nous permettent d'estimer le frottement sur le fond dans les Pertuis Charentais en tenant compte de la nature des fonds marins (frottement « skin friction ») Dans la plupart des cas, le frottement est dominé par la rugosité des fonds due à la présence des structures morphologiques : bancs, dunes, chenaux, etc. Un ajustement empirique du coefficient de frottement est, donc, nécessaire pour tenir compte de l'ensemble de ces structures présentes dans les Pertuis.

5. Diffusion de la vitesse

La diffusion de la vitesse, représentée par le coefficient de diffusion de vitesse uniforme sur le domaine de calcul dans le modèle. Sa valeur est établie à 0.1 m²/s. Elle a été retenue car basée sur les validations du modèle numérique de Nicolle (2006) sur le code Telemac dans les Pertuis Charentais.

Modèle hydrodynamique 3D

Un modèle hydrodynamique 2D a été précédemment utilisé pour les Pertuis Charentais dans le cadre de ce doctorat. Afin de répondre plus en détails aux questions apportées par le transport de particules et la circulation de courants dans notre zone d'étude, il a été décidé de tester le code tridimensionnel Telemac 3D. L'évolution des modèles numériques, en particulier le passage de la 2D au 3D, permet de simuler les variations verticales des courants et d'avoir une meilleure prise en compte de processus importants tels que : le frottement sur le fond, la turbulence et les contraintes de cisaillement. Pour le transport de particules, il permet des simulations avec des lâchés dans la colonne d'eau et supprime la restriction de flotteurs de surface. La validation hydrodynamique du modèle est réalisée par comparaison des mesures de profils de courants obtenues avec les ADCP déjà utilisés dans le modèle 2D.

Les bases du modèle 3D sont les mêmes que celles du modèle 2D : l'emprise du modèle, le forçage et la bathymétrie restent inchangés. Le maillage bidimensionnel passe à un maillage tridimensionnel constitué de prismes. La répartition des plans sur la verticale est faite en fonction du pourcentage de la hauteur d'eau sur 10 plans.

Analyse harmonique

L'analyse harmonique du signal de marée permet aussi bien l'analyse de données marégraphiques que la reconstruction et la prédiction du signal de marée.

Les composantes harmoniques de marées sont des sinusoïdes dont les amplitudes et les phases peuvent être déterminées pour chaque lieu d'observation. La formule mathématique pour décrire la hauteur d'eau (h) d'un lieu spécifique à l'instant t du lieu est :

$$h(t) = Z0 + \sum_{i=1}^n [A_i \cos(\omega_i t - \varphi_i)] \quad (34)$$

Pour i de 1 à n , n étant le nombre d'ondes :

- Z_0 est égal au niveau moyen, l'onde oscille autour de cette valeur.
- A_i est l'amplitude de l'onde i concernée
- ω_i est la pulsation de l'onde, elle est égale à $\frac{2\pi}{T_i}$ (où T est la période de l'onde i)
- φ_i est la phase de l'onde.
- t est le temps

L'ensemble des constantes A_i et φ_i est appelé « constantes harmoniques » du lieu étudié. Elles sont propres à chaque marégraphe. Des ondes additionnelles de périodes voisines aux constituants majeurs, correspondant aux « corrections nodales » de ces ondes, sont intégrées dans le calcul.

On peut rajouter le terme $R_{(t)}$ à la fin de cette équation : c'est le résidu. Il représente la différence de hauteur d'eau entre la marée prédite mathématiquement grâce aux harmoniques de marées, et la marée observée à l'instant t causée par des surcotes ou des décotes.

Pour calculer la hauteur d'eau (h) à un moment donné (t), il faut déterminer les valeurs de l'amplitude, la phase ainsi que la pulsation de la marée. La pulsation est calculée à partir du développement du potentiel générateur de la marée, tandis que l'amplitude et la phase sont déterminées par expérimentation. En eaux peu profonde les marées produisent des harmoniques supérieures comme M4 et M6. Les harmoniques supérieures deviennent importantes lorsque la profondeur d'eau comparée à l'amplitude de la marée est significative.

Nous avons utilisé le logiciel d'analyse harmonique t_tide (Pawlowicz et al., 2002) durant cette thèse. Il permet d'analyser les données de hauteur d'eau donnée par un marégraphe pour une période de temps voulue. Ce logiciel applique la méthode des moindres carrés et détermine les amplitudes et les phases des composantes harmoniques. T_tide extrait les constituants qui peuvent être analysés suivant la durée d'observation. Afin de pouvoir extraire certaines ondes et de les séparer les unes des autres, une durée d'enregistrement suffisamment longue est nécessaire (Tableau 7).

La série temporelle doit respecter le critère de Rayleigh, qui est le critère de séparation des ondes le plus souvent employé. Il permet de connaître la période minimale d'observation nécessaire à la séparation de deux ondes de fréquences voisines f_1 et f_2 .

$$T \geq \left| \frac{1}{f_1 - f_2} \right| \quad (35)$$

Foreman (1977) a déterminé la durée d'observation minimale nécessaire pour extraire un constituant, qu'il soit d'ordre astronomique ou bien non-linéaire. En voici quelques exemples (Tableau 7):

Nom du constituant	Temps en heures nécessaire pour inclure le constituant
Semi-diurne	
M2	13
S2	355
N2	662
K2	4383
Diurne	
K1	24
O1	328
Onde tiers diurne et supérieures	
MN4	662
MS4	355
S4	355
2MN6	662
2MS6	355
M4	25
M6	26

Tableau 7 : Durée d'observation minimale nécessaire pour extraire le constituant (Foreman, 1977)

La durée d'enregistrement ainsi que la précision de données marégraphiques sont donc des points sensibles. Les observations de hauteur d'eau doivent être assez longues afin d'obtenir une analyse harmonique précise.

Conclusion

Le modèle basé sur Telemac 2D a été construit pour procéder aux simulations hydrodynamiques de la marée et du transport des méduses dans les Pertuis Charentais. Ce domaine s'étend du sud de la Vendée jusqu'à la Gironde et couvre une superficie de 28000 km², délimitée par le trait de côte IGN. Les étapes de développement d'un modèle aux éléments finis incluent l'utilisation de données bathymétriques, d'un maillage en éléments finis et de conditions de forçages sur la frontière ouverte et les fleuves. Toutes ces caractéristiques ont été incluses dans le modèle avec de nouvelles données : un forçage sur la frontière ouverte issu de FES2010, un maillage généré avec une méthode permettant d'affiner les zones peu profondes sans alourdir les temps de calculs et une bathymétrie générée avec des données Litto3D, traduite par un MNT. Seuls les débits des fleuves restent inchangés et constants en débit durant les simulations, en accord avec les travaux de Nicolle (2006).

Dans le cadre de cette thèse, le modèle doit répondre avec succès à la modélisation de la marée et au suivi de méduses virtuelles, représentées par des particules-traceurs. La phase de calage des modèles hydrodynamiques est généralement longue et semi-empirique. Dans un

premier temps, la calibration doit être réalisée pour les marées en comparant les données marégraphiques et les résultats de modélisation par analyse harmonique. Des campagnes de mesures marégraphiques complémentaires ont été menées aux Baleineaux et à l'île d'Aix afin de calibrer avec plus de précisions le modèle. Une attention particulière doit être portée sur l'ajustement d'un coefficient de frottement adéquat. Dans un second temps, une validation du modèle a été obtenue en comparant les résultats de modélisation et les enregistrements pour l'ensemble des ADCP de la zone. La qualité de représentation des vitesses de courants marins valide lors la capacité du modèle à prédire le transport. Une partie importante de cette thèse est donc appliquée au calage du modèle par comparaison à l'ensemble des observations réalisées et collectées, de manière à s'assurer de la bonne représentation des conditions hydrodynamiques des Pertuis Charentais.

Chapitre III : Modélisation des marées dans les Pertuis Charentais

Calibration du modèle de marée

La calibration et la validation des prédictions d'un modèle sont des étapes essentielles de sa construction. Le plus souvent, les modèles de marée sont calibrés et validés avec des enregistrements marégraphiques. Dans ce chapitre, nous commencerons aussi une calibration classique en confrontation les amplitudes et les phases des ondes de marées prédites par le modèle à celles estimées à partir des mesures marégraphiques. Ensuite, nous examinerons l'effet de différentes valeurs de coefficients de frottement au fond et choisirons le modèle optimal dans des modèles avec coefficient du frottement uniforme dans les Pertuis Charentais.

Une nouvelle approche de calibration du modèle de marée sera développée dans la partie suivante. Cette méthode est basée sur la comparaison de la position de la ligne d'eau, frontière entre l'eau et la terre, avec celle prédite par le modèle. Elle sera appliquée en utilisant les images satellites de la Baie de Marennes-Oléron. Nous examinerons par la suite l'effet dû à la disparité du frottement entre la Baie et les Pertuis Charentais sur les constituants tidaux et les lignes d'eau.

1. Calibration du modèle à coefficient de frottement uniforme

Le modèle tidal a été calibré en utilisant le coefficient de Chézy avec une gamme de valeurs allant de 50 à 120 m.s^{-1} . Pour comparer les résultats du modèle et les données marégraphiques, une analyse harmonique a été effectuée sur l'ensemble des résultats pour chaque scénario et pour chaque marégraphe. L'analyse a été effectuée grâce à logiciel *t_tide* (Pawlowicz et al., 2002). Le modèle a été lancé sur toute l'année 2001 afin de respecter le critère de Rayleigh et séparer proprement K2 de S2, ce qui nécessite au minimum 299 jours (Bertin et al., 2012; Simon and Gonella, 2007).

Dans cette partie, nous présenterons la réponse des ondes M2, M4 et M6 à différents cas de frottements sur le domaine. La marée dans les Pertuis Charentais est semi-diurne et dominée par la composante M2. Nous avons analysé la réponse de la famille d'ondes M2, M4, M6 au changement du coefficient de frottement. Les ondes M4 et M6 font partie des harmoniques tidales issues des interactions non linéaires entre les ondes. L'onde M4, qui est l'harmonique de l'onde M2, est générée par la non-linéarité de M2 due aux termes d'advection, aux termes de divergence dans l'équation de la continuité et au frottement. Par contre, l'onde M6 est générée par les termes de frottement au fond (Orbi, 1986). Comme nous nous intéressons aux effets du frottement, le choix de se restreindre à ces ondes est ici justifié.

Onde M2

M2	Observation				Chezy 50		Chezy 75		Chezy 100	
	A_{obs}	A_{err}	ϕ_{obs}	ϕ_{err}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Baleineaux	162	3	97	1	165,7	97,3	166,2	96,3	166,2	96,3
Pallice	175	1	98,2	0,1	174,5	100,3	175,2	97,8	175,1	97,8
Cotiniere	154	3	93	1	154,6	93,3	154,9	92,9	154,9	92,9
Aix	180	1	97,6	0,2	178,3	100,7	179,4	97,6	179,4	97,4
Chapus	172	2	102	1	170,0	107,9	172,3	102,5	172,8	101,3

Tableau 8 : Amplitudes (cm) et phases (°) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2

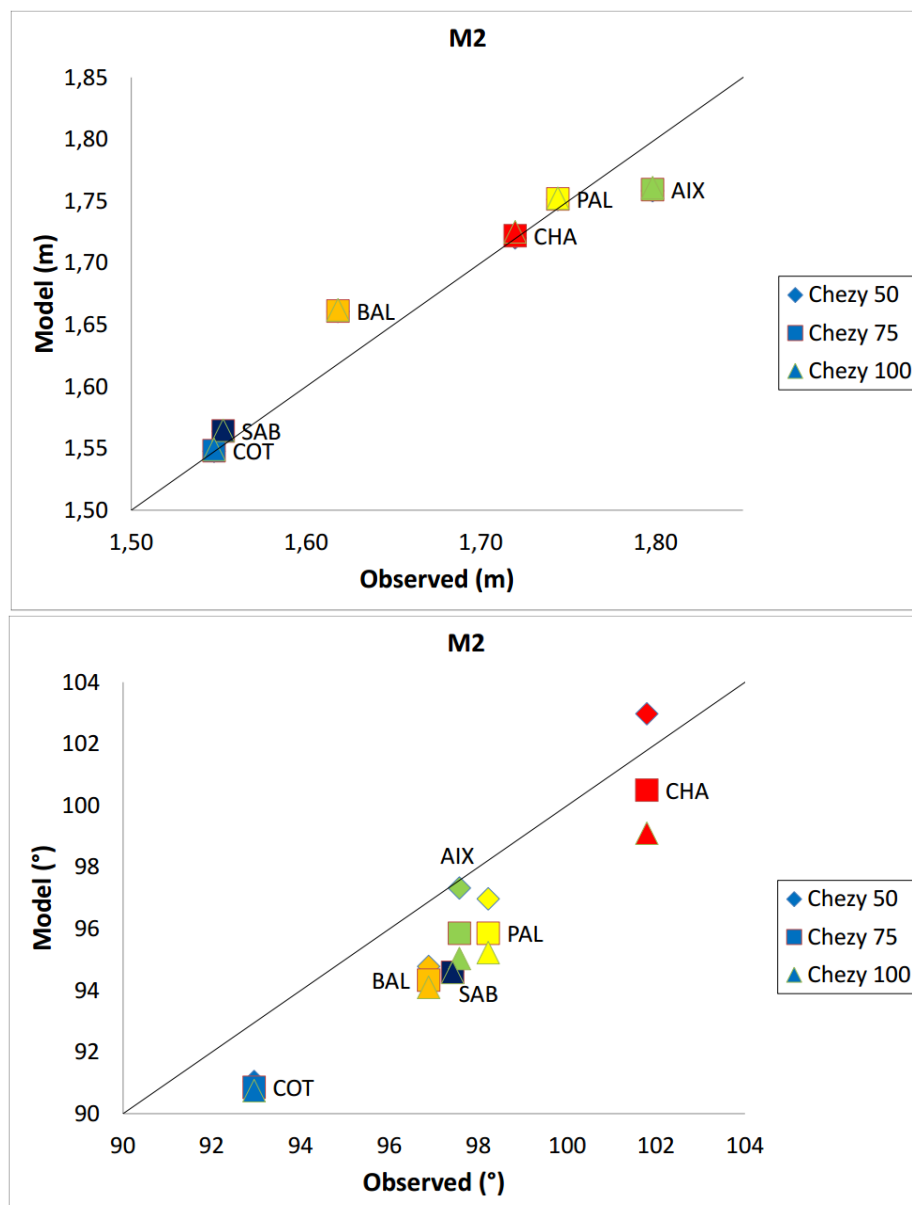


Figure 26: Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2.

Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

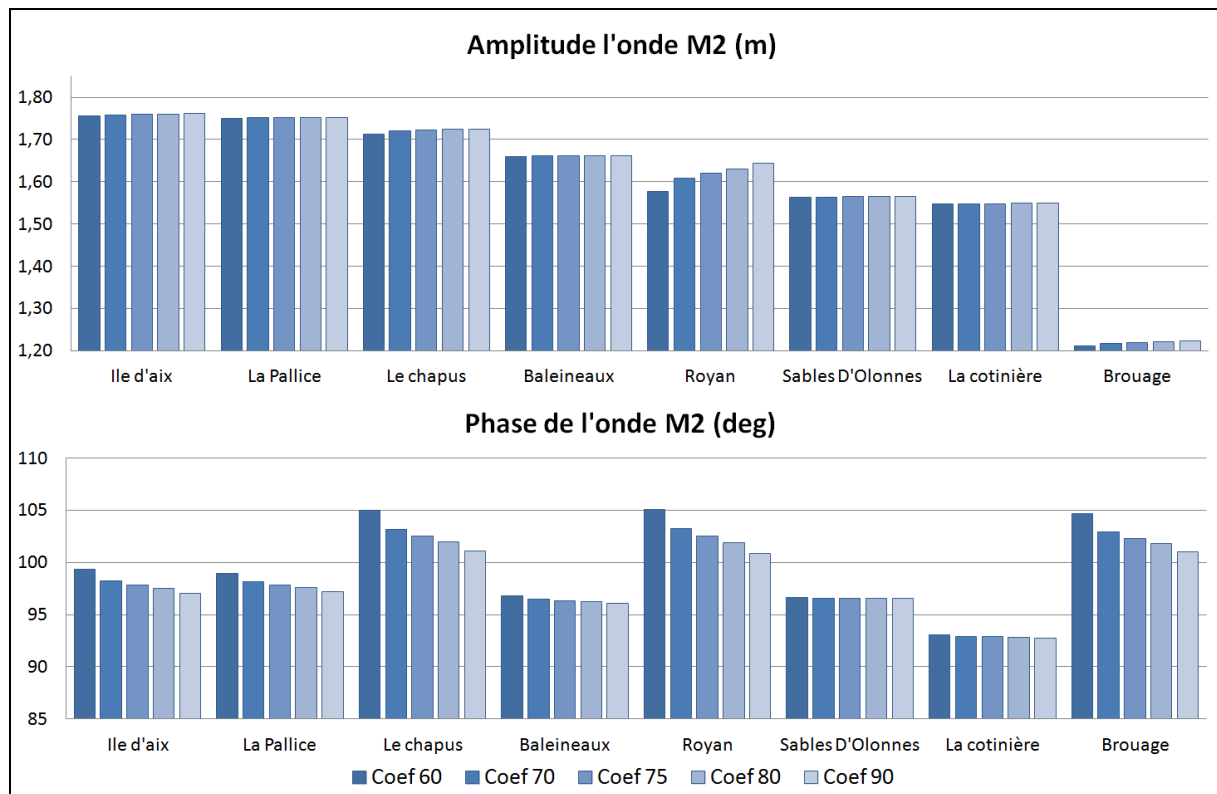


Figure 27 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M2 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$)

Pour les points situés à l'extérieur des Pertuis, à savoir les Sables d'Olonnes, la Cotinière et les Baleineaux, l'amplitude et la phase de l'onde de marée M2 ne sont pas influencées par les changements des coefficients de frottement imposés dans le modèle. Les résultats sur l'amplitude et la phase montrent une différence inférieure à 1 cm (Tableau 8). À partir de la Pallice, le changement du coefficient de frottement commence à influencer l'amplitude et la phase. Plus l'onde de marée s'enfonce dans les Pertuis et dans la Baie de Marennes-Oléron, plus le coefficient de frottement est influent sur M2 ; et plus le coefficient de frottement est faible plus l'amplitude diminue et la phase augmente (Figure 26 ; Figure 27). On voit très bien l'influence du coefficient de frottement au Chapus avec des différences de 6 degrés sur la phase et de 3 centimètres sur l'amplitude.

Onde M4

M4	Observation				Chezy 50		Chezy 75		Chezy 100	
	A_{obs}	A_{err}	ϕ_{obs}	ϕ_{err}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Baleineaux	18	1	9	4	17,8	8,0	18,3	3,2	18,3	3,2
Pallice	25	1	10	2	21,4	15,9	23,0	5,1	23,1	4,6
Cotiniere	14	1	340	5	13,0	340,8	13,1	339,0	13,1	339,0
Aix	26	1	7	2	22,4	15,7	24,5	2,7	24,7	1,9
Chapus	23	1	23	3	18,2	50,6	20,9	26,5	21,8	21,3

Tableau 9 : Amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4

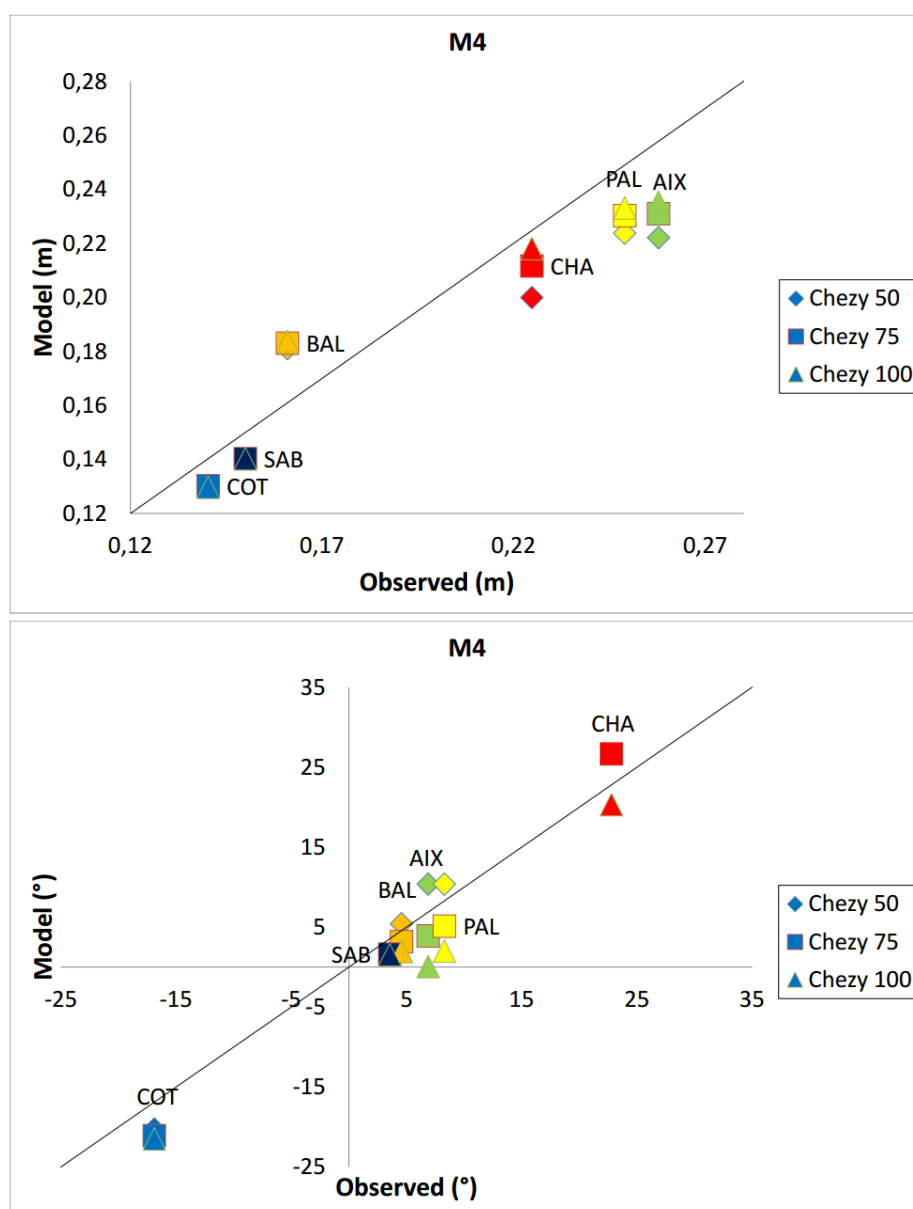


Figure 28: Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases ($^{\circ}$) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4

Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

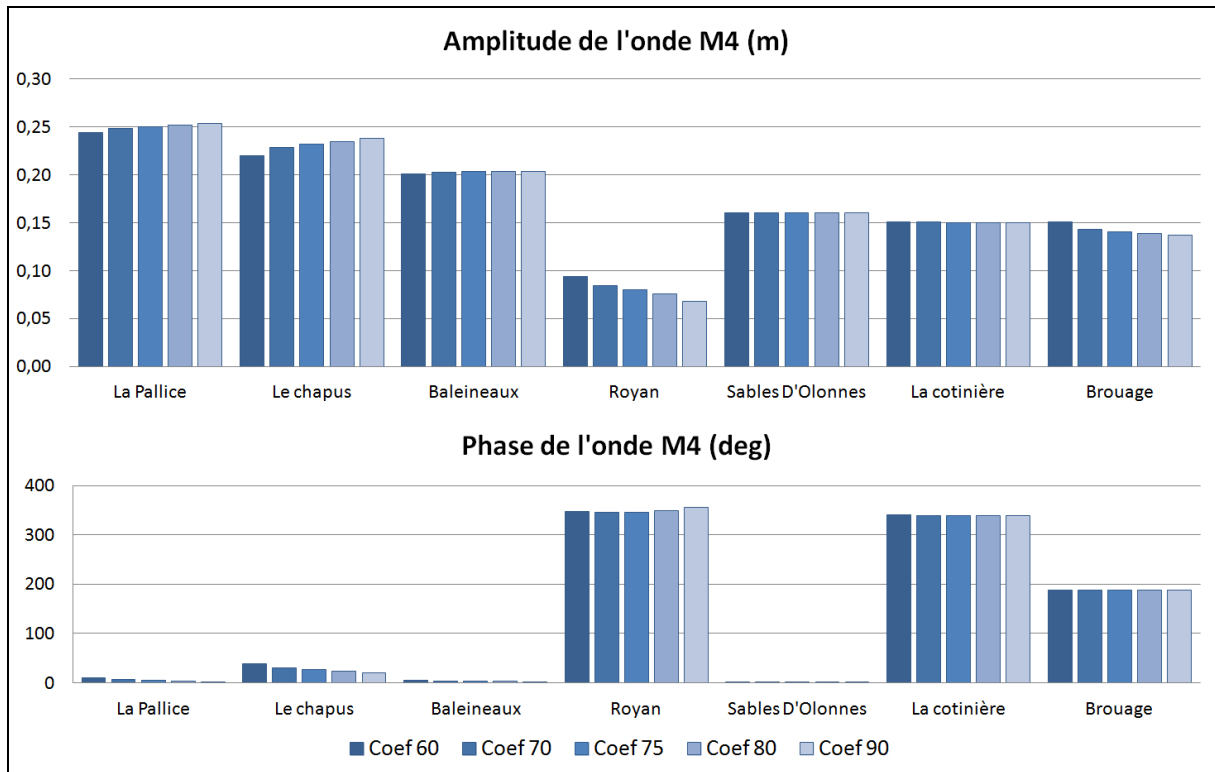


Figure 29 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M4 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$)

La réponse de l'onde M4 au coefficient de frottement est similaire à celle de l'onde M2 (Tableau 9). L'influence du coefficient de frottement sur les points hors du Pertuis est négligeable pour M4, et on retrouve l'augmentation de l'amplitude et la diminution de la phase lorsque le coefficient est élevé (Figure 28 ; Figure 29).

Onde M6

M6	Observation				Chezy 50		Chezy 75		Chezy 100	
	A_{obs}	A_{err}	ϕ_{obs}	ϕ_{err}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Baleineaux	2,5	0,5	320	9	1,7	313,9	1,7	292,4	1,7	289,2
Pallice	5	1	281	4	4,1	303,9	4,8	276,2	5,0	271,7
Cotiniere	1,5	0,4	224	20	0,5	227,2	0,5	226,8	0,5	222,9
Aix	4,2	0,5	305	7	5,2	295,9	6,0	268,3	6,4	263,8
Chapus	2,4	0,3	332	9	2,7	321,0	3,1	292,5	3,2	285,2

Tableau 10 : Amplitudes (cm) et phases ($^{\circ}$) observées et leurs erreurs, comparées à celles modélisées pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6

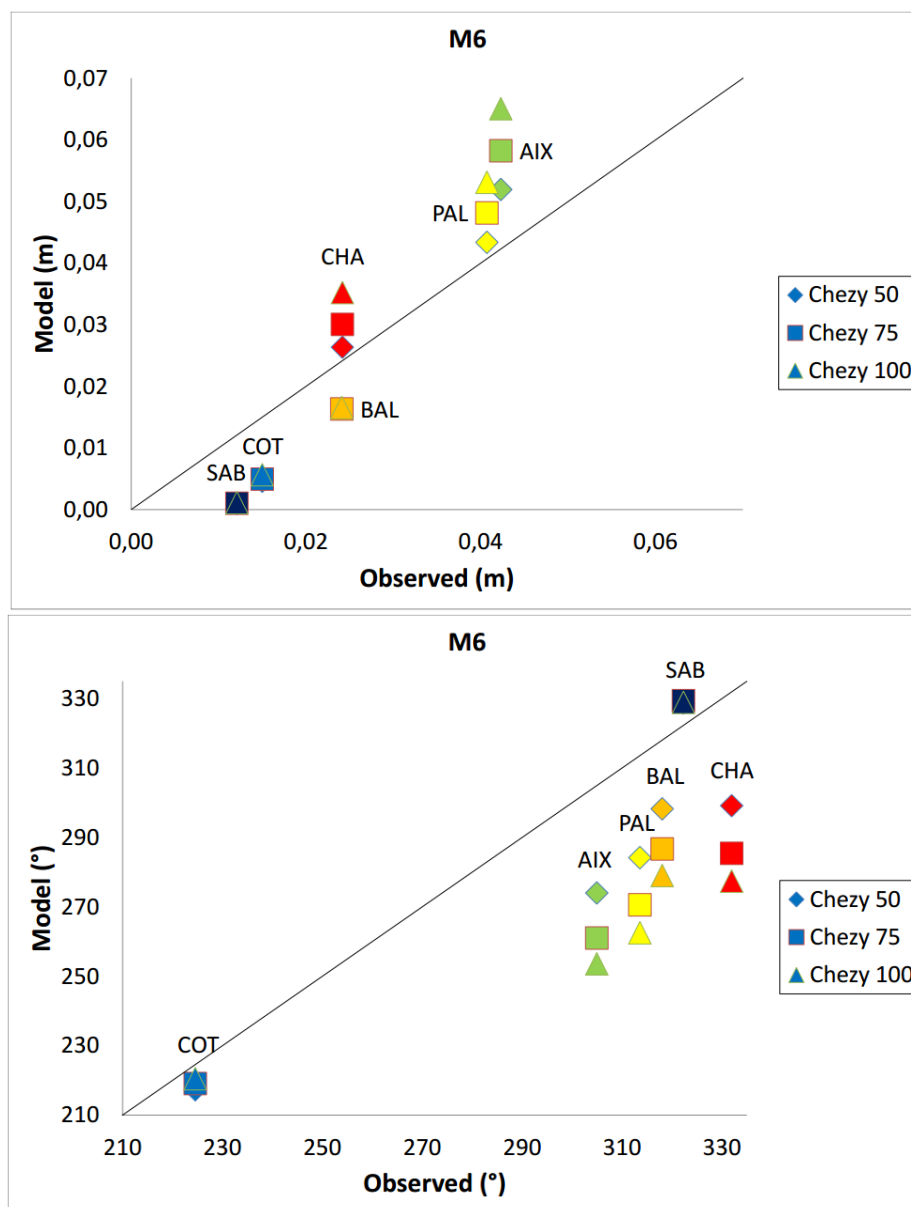


Figure 30 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases ($^{\circ}$) pour différents coefficients de frottement dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6

Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

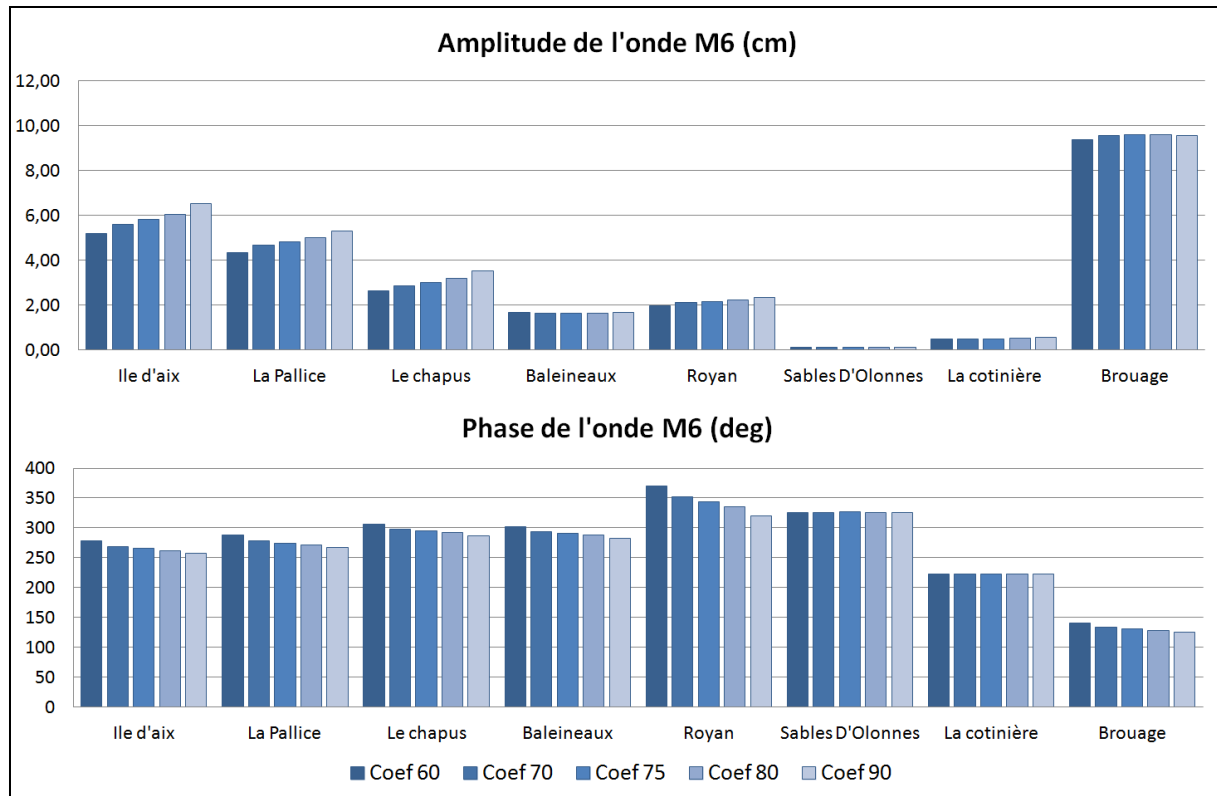


Figure 31 : Comparaisons des Amplitudes et Phases de l'onde M6 en fonction de plusieurs coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$)

L'onde M6 est très faible dans tous les cas de frottement dans les zones où l'onde de marée atteint directement la côte avec une bathymétrie qui remonte rapidement, comme les Sables d'Olonnes et la Cotinière (Tableau 10). Les Baleineaux, avec une bathymétrie qui remonte plus doucement, montrent une amplitude de M6 un peu plus élevée. On observe une amplification de M6 marquée à l'intérieur des Pertuis avec une diminution de sa phase au fur et à mesure que l'on approche l'intérieur de la Baie de Marennes-Oléron (Figure 30). Brouage, qui se situe directement sur la vasière, possède l'amplitude maximale de M6 dans les Pertuis, tandis que sa phase est la plus faible. De manière générale, l'amplitude de M6 diminue avec un coefficient sur le fond faible alors que sa phase augmente (Figure 31).

2. Résumé des résultats sur calibration aux marégraphes

Il existe plusieurs indices et critères pour quantifier la performance des modèles tidaux en termes de leur proximité aux observations (Simon, 2005). Leurs utilisation est dictée par l'objectif de la modélisation. L'écart-type (Equation 36) ou l'écart moyen absolu (Equation 37) entre le niveau de la mer observé et prédit restent les indices de la qualité le plus fréquemment utilisés :

$$E1 = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Onde\ obs - Onde\ mod)^2\right)} \quad (36)$$

$$E2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Onde\ obs - Onde\ mod| \quad (37)$$

Bien que des nouvelles techniques aient été développées récemment (Allen et al., 2007) pour caractériser de la performance des modèles complexes avec plusieurs variables de grandes dimensions (par ex, les modèles des écosystèmes) nous avons choisi ici la moyenne des écarts absolus (Equation 37) pour quantifier la proximité des amplitudes et phases modélisées aux celles prédites (Tableau 11). Nous constatons que le déphasage entre les ondes prédites et observées augment systématiquement avec l'intensité du coefficient de Chézy, le couplage par frottement entre le fond et de l'eau s'affaiblit. Au contraire, l'augmentation du coefficient de Chézy ne change guère l'amplitude de l'onde M2, abaisse l'amplitude de M4 et amplifie celle de M6. Par conséquence, le coefficient de Chézy autour de $C = 75\text{ m}^{0.5}/\text{s}$ semble d'être une valeur optimale pour un modèle avec le coefficient de frottement uniforme. Notons, également, que l'écart type (Equation 36) calculé sur l'année 2001 entre le niveau de la mer prédit par notre modèle tidal et celui mesuré aux marégraphes, varie entre 14.5 et 15.3 cm pour différentes valeur du coefficient de Chézy.

Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100	
M2	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Ile d'aix	4,3	0	3,9	2	3,7	3
La Pallice	0,5	1	0,8	2	0,8	3
Le chapus	0,6	1	0,2	1	0,6	3
Baleineaux	4,1	2	4,3	3	4,4	3
Sables D'Olonnes	1,1	3	1,2	3	1,2	3
La cotinière	0,1	2	0,1	2	0,2	2
E2	1,8	2	1,7	2	1,8	3
Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100	
M4	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Ile d'aix	3,6	3	2,7	3	2,3	7
La Pallice	2,5	2	1,9	3	1,6	6
Le chapus	2,5	15	1,3	4	0,7	2
Baleineaux	2,0	1	2,2	1	2,3	3
Sables D'Olonnes	1,0	2	1,0	2	1,0	2
La cotinière	1,0	3	1,0	4	1,1	5
E2	2,1	4	1,7	3	1,5	4
Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100	
M6	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Ile d'aix	1,0	31	1,6	44	2,3	51
La Pallice	0,3	29	0,7	43	1,2	51
Le chapus	0,2	33	0,6	47	1,1	55
Baleineaux	0,8	20	0,8	31	0,8	39
Sables D'Olonnes	1,1	6	1,1	7	1,1	7
La cotinière	1,0	7	1,0	5	0,9	4
E2	0,7	21	1,0	30	1,2	34

Tableau 11 : Ecart moyen absolu des Ondes M2, M4 et M6 en Amplitudes (cm) et phases(°) aux différents marégraphes

3. Méthode des lignes d'eaux

En tenant compte de la calibration du modèle effectuée sur les amplitudes et phases des constituants de marée du modèle, le Tableau 11 donne un coefficient de frottement Chézy 75 constant sur le domaine comme une valeur appropriée pour la modélisation des marées dans les Pertuis Charentais et pour l'estimation des temps d'immersion sur les vasières intertidales.

Cependant, et afin de s'assurer avec plus de précision des résultats du modèle, et ce en particulier sur les vasières intertidales, une deuxième technique de calibration a été pratiquée. Il s'agit de la méthode des lignes d'eaux visant à discerner la limite terre-eau sur des images satellites, cette limite est appelée Ligne d'Eau ou Water Line (Mason et al., 1997). La ligne

d'eau observée est comparée à la ligne d'eau prédite sur la vasière au même moment. Le résultat nous permet de vérifier la réponse du modèle spatialement à un instant donné. Comme pour les analyses harmoniques, plusieurs coefficients de frottement ont été testés.

Images satellites et données utilisées

Pour se rendre compte de l'impact de la ligne d'eau (WL) sur le modèle numérique, un travail de collecte de données d'images satellitaires a été mené. Les images recherchées et retenues doivent envelopper les Pertuis Charentais et particulièrement la région des Estrans, avec la Baie de Marennes-Oléron. Deux satellites ont été retenus pour l'étude : le satellite SPOT et le satellite Landsat qui apportent une résolution acceptable pour l'étude menée. De plus, le distributeur des images SPOT est en partenariat avec l'Université de La Rochelle et les données de Landsat sont en libre accès.

Les images SPOT (<http://www.astrium-geo.com/>) fournissent des images optiques géoréférencées avec une haute résolution et un large champ. Elles proviennent de trois satellites : le satellite SPOT 3 lancé en 1993, SPOT 4 lancé en 1998 et SPOT 5 lancé en 2002. Les images se présentent sous la forme d'une dalle de 60 par 60 kilomètres possédant plusieurs bandes spectrales pour les trois satellites:

- Bande 1 : Vert (0,50 - 0,59 μm),
- Bande 2 : Rouge (0,61 - 0,68 μm),
- Bande 3 : Proche infrarouge (0,78 - 0,89 μm),
- Bande 4 : Moyen infrarouge (1,58 - 1,75 μm).

En tout, 32 images ont été ainsi récoltées entre 1994 et 20010 avec une résolution de 20 à 2.5 mètres.

Les images Landsat (<http://www.usgs.gov/>) proviennent toutes du satellite Landsat 7 lancé en 1999. Ce sont des images satellites multi-bandes haute résolution, géoréférencées et présentées sous forme de dalle. Landsat 7 dispose de 8 bandes de fréquences :

- TM1 : Bleu (0.45-0.5 μm)
- TM2 : Vert (0.52-0.6 μm)
- TM3 : Rouge (0.63-0.69 μm)
- TM4 : Proche infrarouge (0.75-0.9 μm)
- TM5 : Moyen infrarouge (1.5-1.7 μm)
- TM6 : thermique/lointain Infrarouge (10.4-12.5 μm)
- TM7 : Moyen infrarouge (2.08-2.35 μm)
- 8 : Panchromatique (vert-rouge-IR) (520-900 nm)

La résolution des bandes TM (*Thematic Mapper*) est de 30 mètres, tandis que la bande panchromatique a une résolution de 15 mètres. Le satellite Landsat 7 est toujours en orbite et

envoi des photos aujourd'hui. Cependant, suite à un problème technique sur la lentille après 2003, il est devenu compliqué de post-traiter les images. Celles retenues se limitent donc à la période 1999-2003 et sont au nombre de 73.

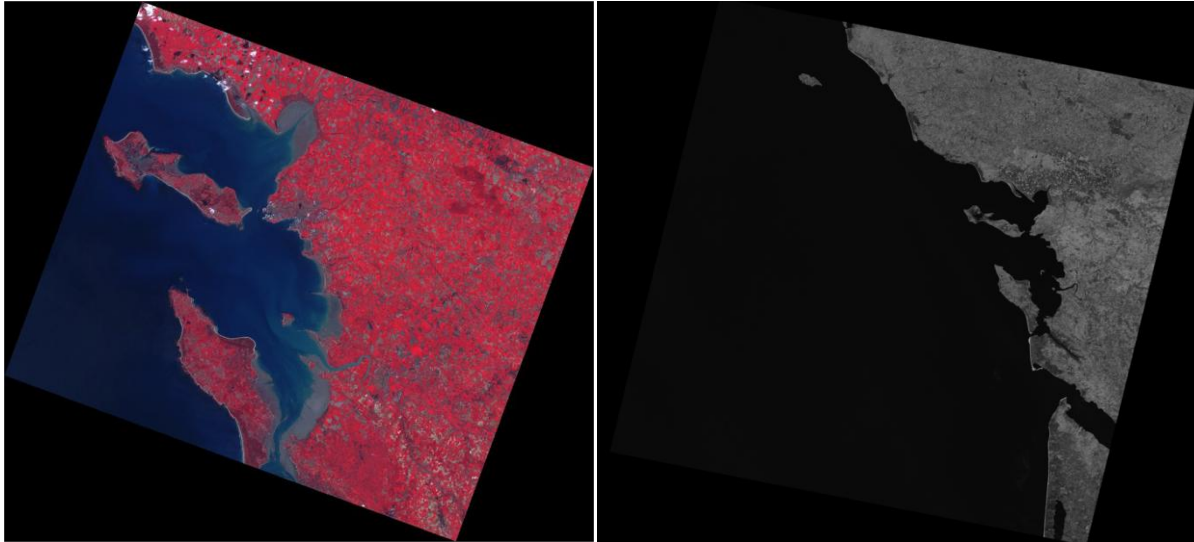


Figure 32 : Exemples d'images satellites : à gauche, une dalle du satellite SPOT 4 et, à droite, une dalle de la bande TM7 Landsat 7.

La base de données d'images satellites comporte 105 images géoréférencées entre 1994 et 2003. Pour extraire la ligne d'eau des images satellites, une sélection d'images adéquates a été faite. Les images retenues ont été choisies en fonction des conditions suivantes :

- L'aire des images est suffisamment petite pour ignorer l'effet de la pente sur la surface libre.
- Le pourcentage de couverture nuageuse est un paramètre critique pour la qualité de l'image. En effet, passé un certain seuil de nuages, les images ne peuvent être traitées. Dans certain cas, des nuages se trouvent sur la zone d'intérêt, rendant l'image inutilisable, ou les nuages sont tellement présents que le post-traitement est impossible. Seules les images satellites ayant une couverture nuageuse inférieure à 5% ont été retenues, ce qui est une valeur acceptable pour extraire les lignes d'eau.
- Les images satellites doivent être associées à différents stades de marée afin de représenter au mieux des situations distinctes de marée, comme la haute ou basse mer.
- Les conditions de vent et de pressions atmosphériques sont des paramètres très influents sur la position de la ligne d'eau. Le modèle est un modèle de marée, seules les images sans grand vent ont été retenues (pas de surcote ou décote).

Après l'application de ces paramètres, une grande partie de ces images a été écartée. Seulement 14 images ont été jugées recevables. L'ensemble des images est repris dans le Tableau 12. La hauteur de la marée et son état d'avancement à la Pallice sont indiqués car cruciaux pour la comparaison avec le modèle de marée.

Date d'acquisition de l'image satellite (UT)	Satellite	Couverture nuageuse (%)	Marée à la Pallice(m)	Phase de marée	Surcote	Vitesse du vent (m/s)	Résolution (m)
1994/03/30, 11:21:15	SPOT 3	0	0,65	Basse	non	9	20
1994/07/14, 11:24:28	SPOT 3	0	2,88	Basse	non	3	20
1999/11/03, 11:28:01	SPOT 4	0	3,58	Haute	non	2	10
2000/03/08, 10:40:22	LANDSAT 7	1	1,11	Basse	non	1	20
2000/07/21, 10:45:20	LANDSAT 7	0	2,96	Basse	non	5	20
2000/09/23, 10:44:26	LANDSAT 7	0	4,96	Haute	non	3	20
2001/05/21, 10:43:50	LANDSAT 7	0	3,36	Haute	non	4	20
2001/06/22, 10:43:25	LANDSAT 7	0	1,32	Haute	non	2	20
2001/07/01, 10:37:09	LANDSAT 7	0	4,62	Haute	non	2	20
2002/06/25, 10:42:25	LANDSAT 7	0	1,66	Haute	non	4	20
2002/09/13, 10:41:52	LANDSAT 7	0	4,62	Basse	non	3	20
2003/03/17, 10:36:31	LANDSAT 7	5	2,17	Haute	non	2	20
2004/04/20, 11:31:34	SPOT 5	0	1,92	Haute	non	3	20
2010/03/02, 11:02:41	SPOT 5	0	0,36	Basse	non	2	2,5

Tableau 12 : Résumé des images satellites utilisées dans cette étude

La base de données comporte cinq images satellitaires SPOT et neuf du satellite Landsat 7. Le traitement numérique des images a été réalisé à l'aide du logiciel ArcMap 10.

Analyses et interprétations des images

Le traitement numérique des images pour l'identification et l'extraction de la ligne d'eau est une étape importante. La littérature offre plusieurs méthodes pour le traitement d'images issues de la télédétection, en particulier pour extraire des lignes spécifiques. Elles incluent la digitalisation des lignes par une investigation visuelle, une méthode de découpage par densité ou une méthode de détection des bordures avec une bande unique, et la classification en utilisant plusieurs canaux (White and El Asmar, 1999). La méthode de classification a été retenue pour l'extraction des lignes d'eau sur les images (Ryu et al., 2002), en particulier Les lignes d'eau ont été délimitées par la classification appelé « Interactive Supervised Classification tool » programmé dans ArcGIS. Le principe consiste à regrouper les mêmes types de sols et à les différencier les uns des autres. Le regroupement nécessite une stratégie de classification, il se fait par le biais de critères de zones. Un échantillonnage de chaque type de sol est effectué pour déterminer les critères de zones. Dans notre cas, l'intérêt est de trouver la limite terre-eau sur les vasières intertidales et déceler la séparation entre la partie sèche et la partie immergée à l'instant de la prise de vue de l'image satellitaire.

C'est le canal proche de l'infrarouge (near infrared) qui est utilisé pour discriminer l'eau. En effet, l'eau a la faculté d'absorber le rayonnement infrarouge dans sa totalité. Une simple pellicule d'eau absorbe quasi entièrement le rayonnement proche infrarouge, ce qui donne un signal extrêmement faible pour les zones inondées dans ce canal. Les canaux proches infrarouges sont sélectionnés sur les satellites pour la détection (La bande 4 de SPOT et la bande TM5 sur les images Landsat).

Une fois la ligne d'eau extraite de l'image, elle est convertie en format « shape » géoréférencé et prête à être comparée avec les résultats du modèle. Cette méthode d'extraction a été appliquée à toutes les images satellites décrites dans le Tableau 12. La précision de la ligne d'eau à la fin du traitement des données est égale à la résolution du pixel de l'image satellite concernée. Les étapes d'extraction de la ligne d'eau sont décrites dans la figure ci-dessous.

.

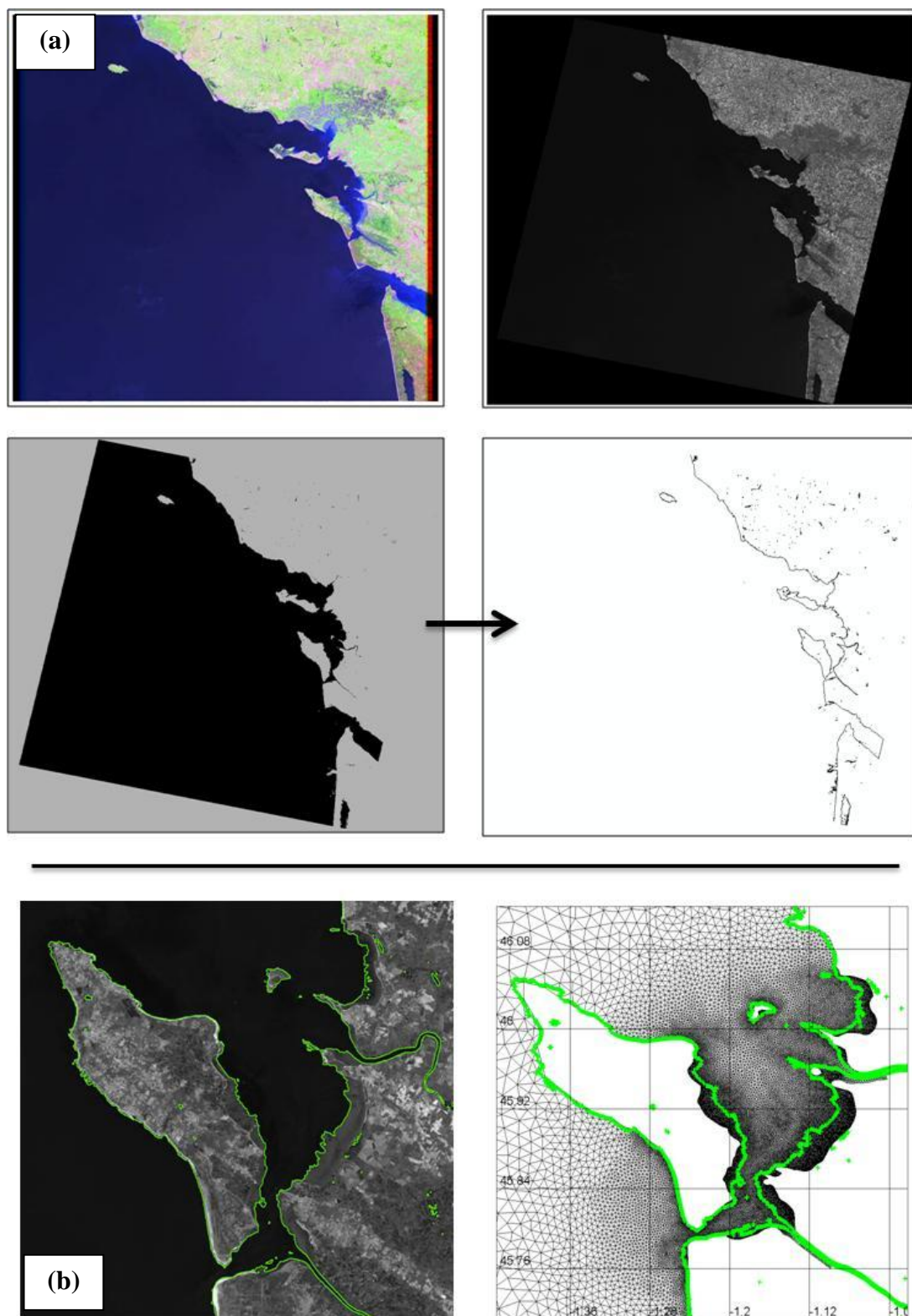


Figure 33 : (a) de gauche à droite : Image satellite Landsat 7 ; Bande TM5 : Moyen infrarouge en WGS84 ; Classification par critères, en noir : les surfaces inondées, en gris, les terre. Résultat final de l'extraction de la ligne d'eau pour cette image.
(b) Superposition de la ligne d'eau extraite et la bande TM5 dans la Baie de Marennes-Oléron ; projection de la ligne d'eau extraite sur le maillage du modèle.

4. Sensibilité de la ligne d'eau au coefficient de frottement

Une fois les extractions terminées, les lignes d'eau ont été projetées sur les résultats du modèle. La figure suivante montre les résultats des lignes d'eau obtenus avec différents coefficients de frottement durant la marée montante et descendante. Le reste des images satellites est présenté dans l'annexe A.

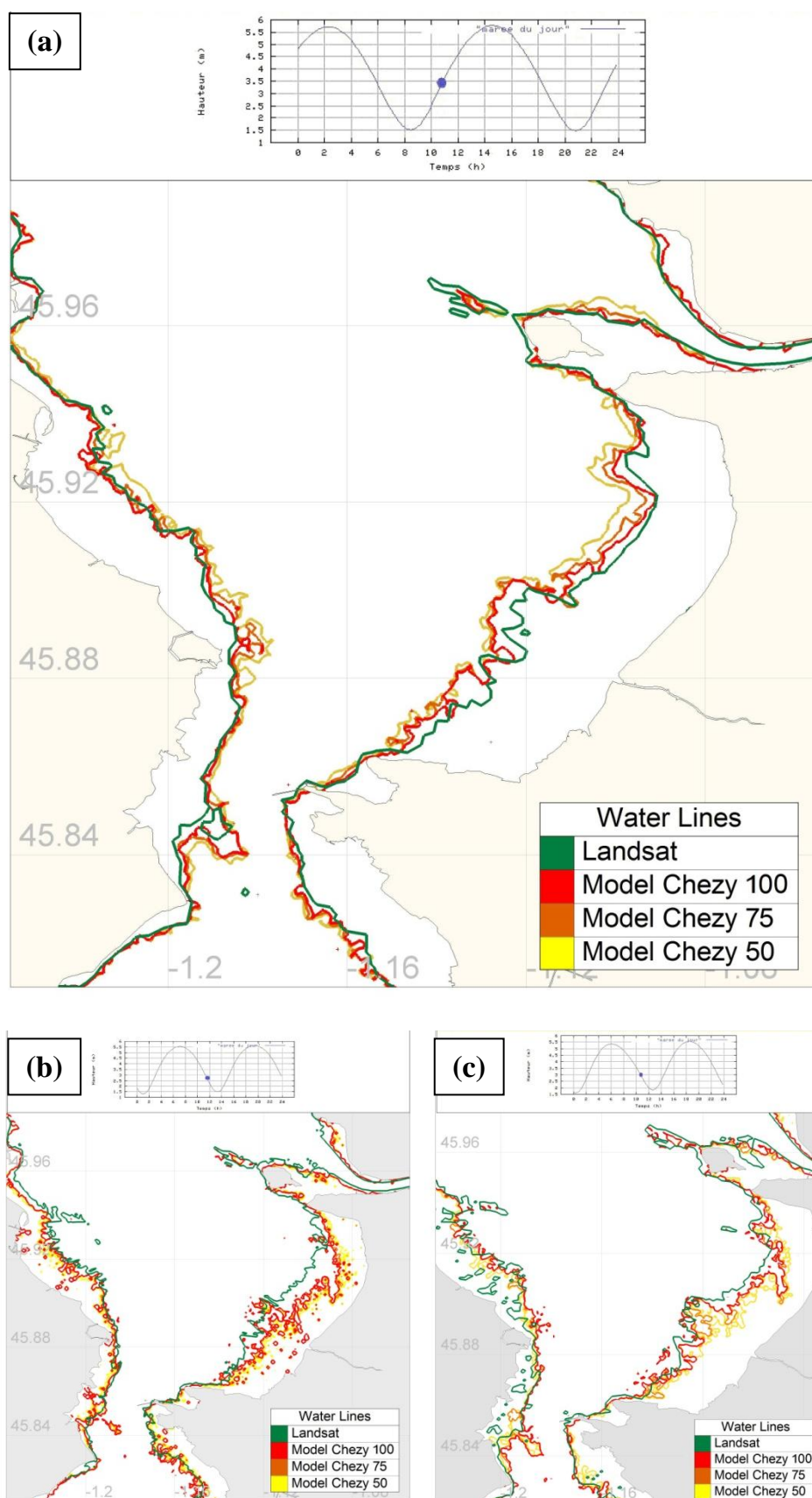


Figure 34. Hauteur d'eau prédite à la Pallice, lignes d'eau observées et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy allant de 50 à 100. Les images satellites ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.

Les résultats présentent trois lignes d'eau issues du modèle de marée, avec trois coefficients de frottement Chézy, 50, 75 et 100, et deux phases de marées.

Marée montante (a): les lignes d'eau modélisées reprennent bien le contour de la ligne observée. À l'ouest de la Baie de Marennes-Oléron, les lignes se superposent avec un petit retard des lignes modélisées. Ce retard est plus prononcé sur la rive Est, avec les lignes modélisées bien distinctes et espacées. L'embouchure de la Charente est conforme à la ligne observée, tout comme le banc découvrant à l'Ouest de l'île Madame.

Marée descendante (b et c): Là aussi les lignes d'eau reprennent le contour de la ligne observée sur la rive Est avec toujours un petit retard. L'embouchure de la Charente est elle aussi bien représentée, tout comme le banc découvrant à l'Ouest de l'île Madame. La situation change entre les deux images pour la vasière de Brouage. Sur l'image de 2000, on remarque que les lignes d'eau sont plus en accord avec les observations faites au montant : bien distinctes et espacées, reprenant le contour de la ligne observée. Pour 1994, les lignes modélisées ne correspondent pas à la forme de celle observées et l'écart entre elles est très grand. On notera que sur les deux images, la ligne prend une forme moins lisse que pour la marée montante. Ceci s'explique par une fine pellicule d'eau sur les estrans qui met du temps avant de s'écouler.

Nous observons que les lignes d'eaux modélisées sont toujours en retard par rapport aux lignes d'eau observées. Pour l'ensemble des images, la meilleure correspondance est obtenue avec un coefficient Chézy de 100. La rive Est et l'embouchure de la Charente présentent de bons résultats pour tous les frottements. La bathymétrie de ces zones géographiques remonte de façon beaucoup plus abrupte que la vasière de Brouage, où la pente est douce. Il apparaît donc que la vasière de Brouage, avec une pente à 1 :1000 (Leguerrier et al., 2004) est plus représentative pour l'application de la méthode. L'ensemble des lignes présente un retard par rapport à l'observation, que ce soit à la marée montante ou descendante. La figure suivante présente le temps nécessaire au modèle pour atteindre les lignes d'eau observées.

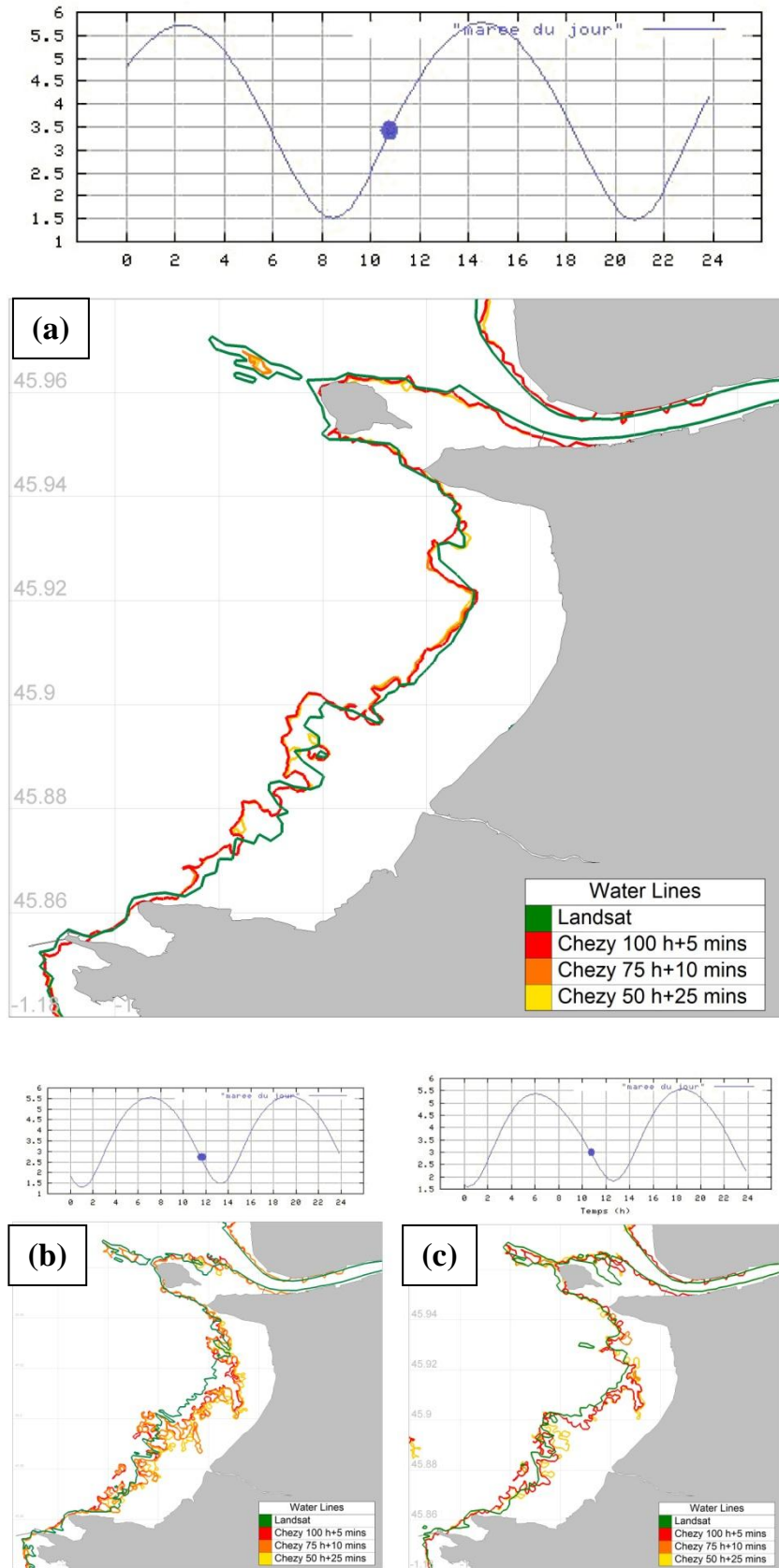


Figure 35 : Hauteur d'eau prédite à la Pallice, lignes d'eau observées et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy allant de 50 à 100 et leur temps de retard. Les images satellites ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.

Pour chaque coefficient de frottement, la ligne d'eau modélisée est derrière la ligne d'eau observée. Pour un Chézy 75, on calcule un retard de 10 minutes entre les deux lignes ; la ligne d'eau prédite a besoin de 10 minutes pour rattraper celle observée. Avec un coefficient de frottement de 50, le retard est de 25 minutes et descend à 5 minutes pour 100. La durée du retard est notable sur toutes les images satellites traitées bien que les stades de marée soient différents.

Marée montante (a): les lignes se superposent bien en espace et collent à la ligne d'eau observée. Les retards calculés sont donc concluants.

Marée descendante (b et c): les lignes se superposent ici aussi même si la différence entre (b) et (c) notée précédemment est ici toujours considérée. En (c) les lignes modélisées correspondent bien à la ligne observée, tandis qu'en (b) les lignes modélisées n'arrivent pas à reproduire la forme de la ligne observée. Les deux images montrent des lignes modélisées qui correspondent très bien d'un côté et pas du tout pour l'autre. Pourtant, la marée est très similaire avec une hauteur d'eau à la Pallice de 2.88m pour 1994 et 2.96m pour 2000, les deux en phase descendante. La bathymétrie des estrans est un point décisif pour appliquer correctement cette méthode. Ces résultats mettent clairement en avant ce point, la bathymétrie du modèle n'est pas adaptée pour reproduire correctement la ligne d'eau de 1994. Les contours des deux lignes d'eau et leurs différences prouvent un changement bathymétrique important entre 1994 et 2000 sur la vasière de Brouage. C'est pour cela que le modèle ne peut reproduire correctement la forme de la ligne de 1994 alors qu'il le fait de manière correcte pour 2000.

Sur les figures, la ligne d'eau prédite avec un coefficient de frottement de 100 reproduit au mieux la ligne d'eau observée. Nous avons vu précédemment que le coefficient de frottement 100 n'est pas un coefficient approprié pour prédire correctement la marée en accord avec les mesures marégraphiques. Ceci démontre clairement que le modèle avec un coefficient de frottement uniforme, permet de prédire avec précision la marée dans les Pertuis Charentais mais échoue dans la prédiction de la ligne d'eau. L'intérêt de cette étude est la prédiction du temps d'immersion avec précision sur les vasières intertidales ; un nouveau procédé est donc nécessaire.

5. Coefficient de frottement variable

Au vu des résultats du modèle sur les vasières intertidales avec un coefficient de frottement uniforme, la stratégie de paramétrisation du modèle a été adaptée avec un coefficient variable sur le fond afin de minimiser les divergences entre les lignes d'eau observées et celles prédites.

Pour établir la sensibilité du modèle au coefficient de frottement, un nouveau coefficient a été attribué en fonction de la nature des sédiments, l'intérieur des Pertuis étant essentiellement vaseux et l'extérieur rocheux ou sableux (Barusseau 1971). Les résultats

obtenus avec un coefficient de frottement uniforme de Chézy 75 donnent des conclusions satisfaisantes pour les marégraphes à l'extérieur du Pertuis Charentais et correspondant à des sables fins. Ce coefficient restera donc inchangé. Une série de tests numériques avec des zones de dimensions variables et de frottement uniforme a été effectué afin de déterminer l'impact sur les constituants tidaux et les lignes d'eau. La figure ci-dessous illustre les différentes zones de frottement variable testées.

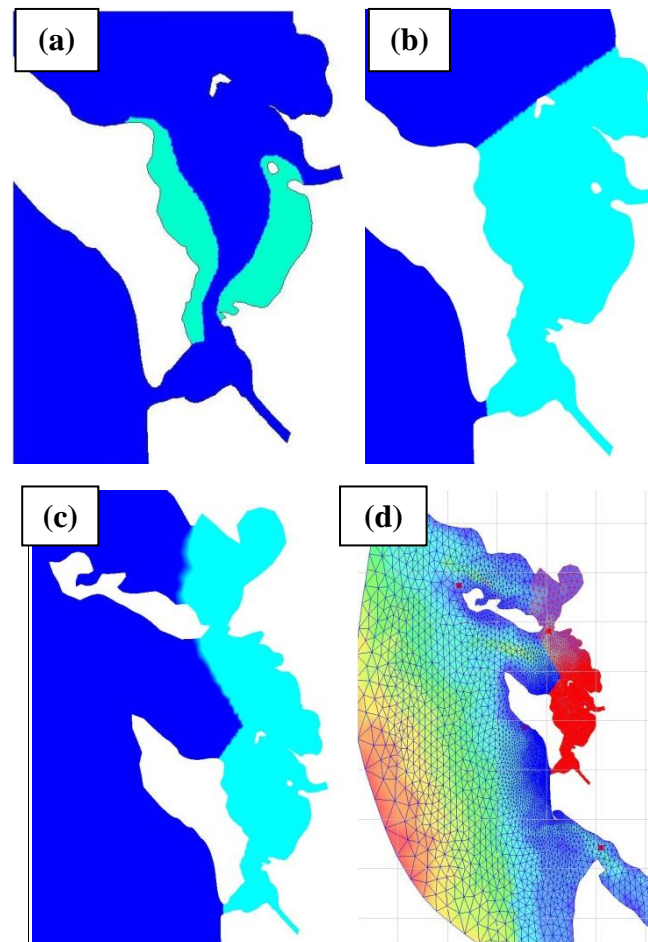


Figure 36 : Types de zones de frottement prenant en compte : (a) les estrans vaseux de la Baie de Marennes-Oléron, (b) la Baie de Marennes-Oléron, (c) les zones vaseuses des Pertuis Charentais et (d) la zone précédente appliquée sur le maillage.

Trois zones ont été retenues, une recouvrant uniquement les vasières intertidales de la Baie de Marennes-Oléron (a), la seconde couvrant l'ensemble des Pertuis Charentais (b) et enfin la dernière englobant l'ensemble des zones vaseuses du Pertuis comme décrit dans la carte de synthèse des types de sédiments des Pertuis Charentais (c) (Nicolle and Karpytchev, 2007). La valeur du coefficient de frottement à l'intérieur des Pertuis a été testée pour un coefficient de Chézy de vases sableuses, ce qui correspond à une valeur de 100.

L'impact d'un changement de frottement seulement sur les estrans (a) est imperceptible sur les résultats des lignes d'eau et des marégraphes comparé un coefficient de frottement constant. La seconde zonation (c) présente peu de différences comparée à la second (b) comme le montre le tableau ci-dessous. L'étude se focalisant sur l'effet du coefficient de frottement sur la vasière de Brouage, seulement le deuxième cas (b) a été retenu.

Marégraphes	M2		M4		M6	
	A_{obs}	ϕ_{obs}	A_{obs}	ϕ_{obs}	A_{obs}	ϕ_{obs}
Aix	180	98	26	7	4	305
Pallice	175	98	19	10	5	281
Chapus	172	102	22	23	2	332
Baleineaux	162	99	18	9	3	319
Cotiniere	154	92	14	339	1	224

Model 75/100 (b)	M2		M4		M6	
	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Aix	180	98	25	4	6	265
Pallice	175	98	23	5	5	272
Chapus	171	101	21	20	3	277
Baleineaux	166	96	18	3	2	289
Cotiniere	155	93	13	339	1	223

Model 75/100 (c)	M2		M4		M6	
	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}	A_{mod}	ϕ_{mod}
Aix	180	98	25	4	6	267
Pallice	175	98	23	5	5	274
Chapus	171	101	21	21	3	278
Baleineaux	166	96	18	3	2	291
Cotiniere	155	93	13	339	1	224

Tableau 13 : Résumé des amplitudes (cm) et phases (°) observées et modélisées pour deux cas de frottement variable appliqué sur le maillage.

Comme pour le modèle de frottement constant, les amplitudes et les phases des ondes M2, M4 et M6 ont été comparées aux observations. Les figures suivantes montrent les observations comparé au modèle de avec frottement variable pour M2, M4 et M6 avec les valeurs du tableau précédent.

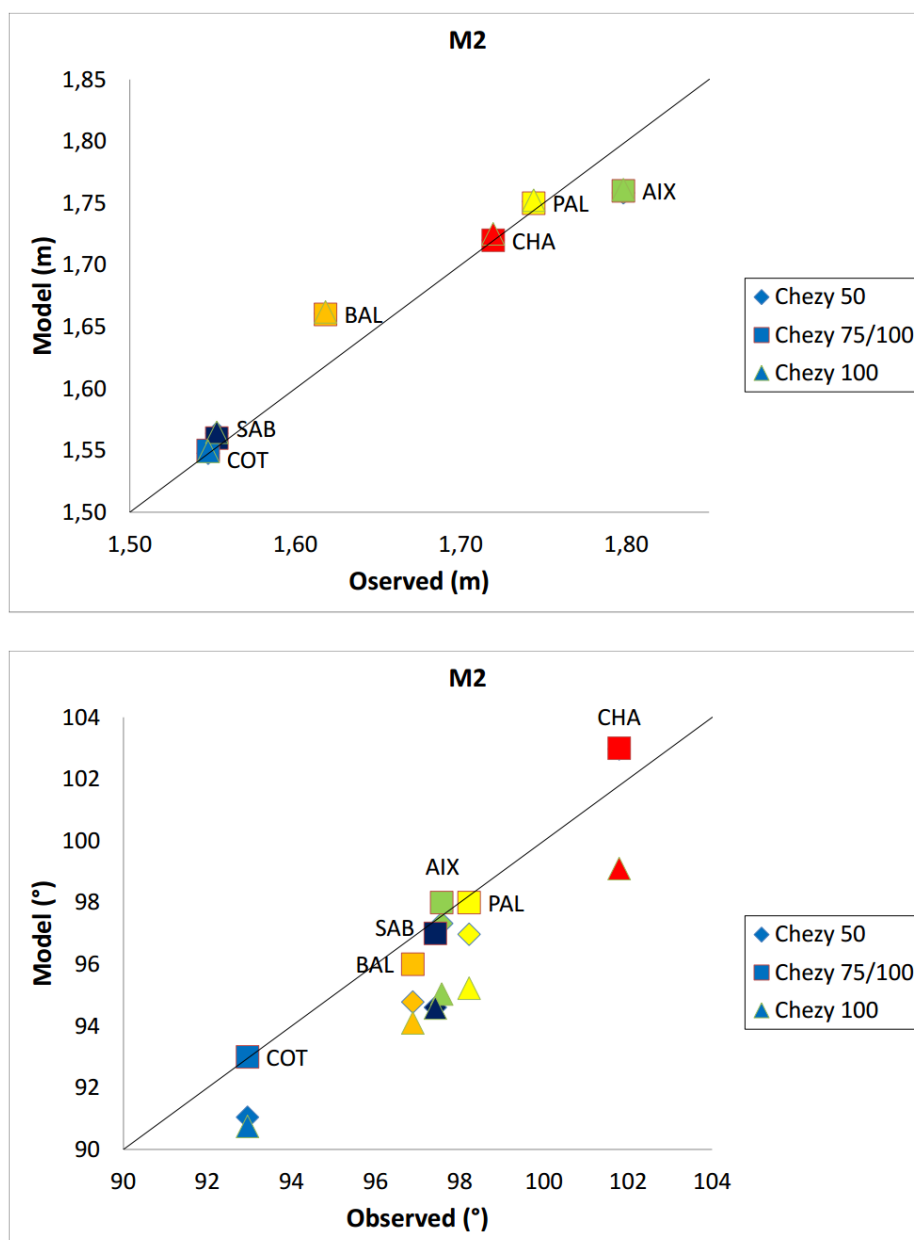


Figure 37 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M2
Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

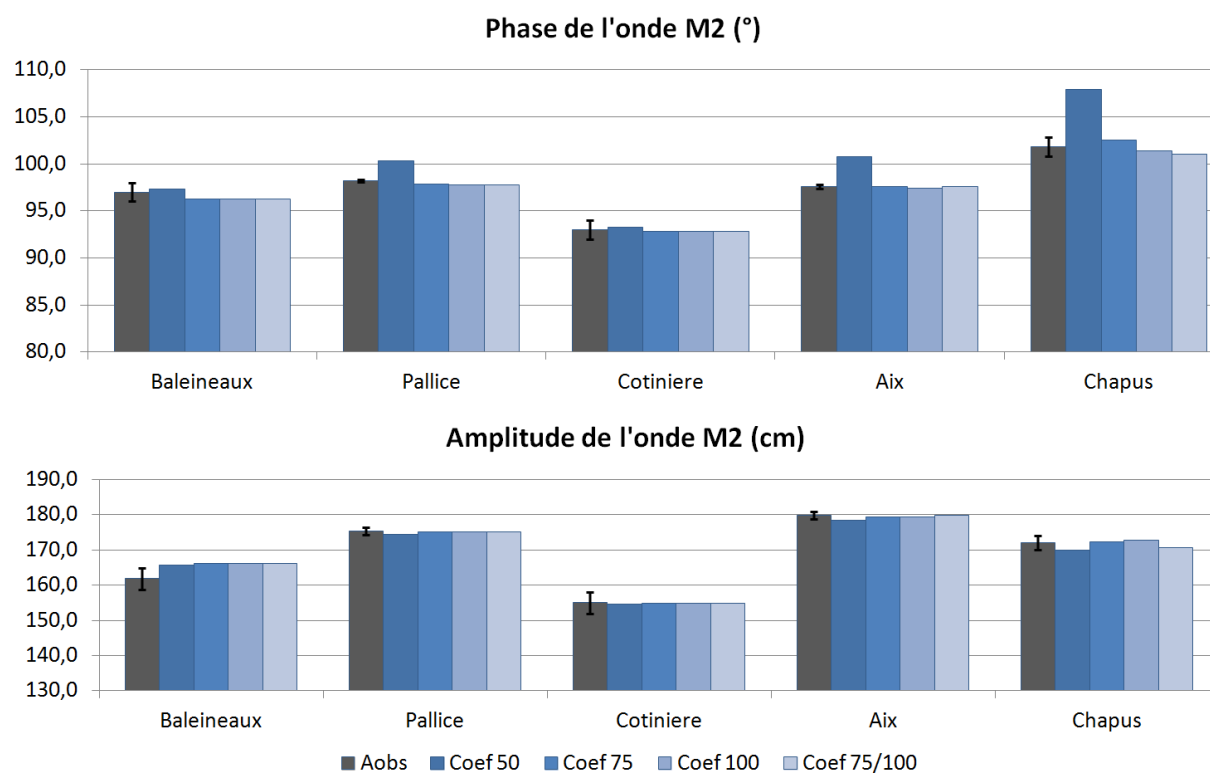


Figure 38 : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M2 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$)

Les valeurs sur la phase de M2 sont toutes améliorées avec le coefficient de frottement variable et ce sur tous les marégraphes. Cependant le coefficient de frottement variable ne montre aucunes améliorations sur l'amplitude observée.

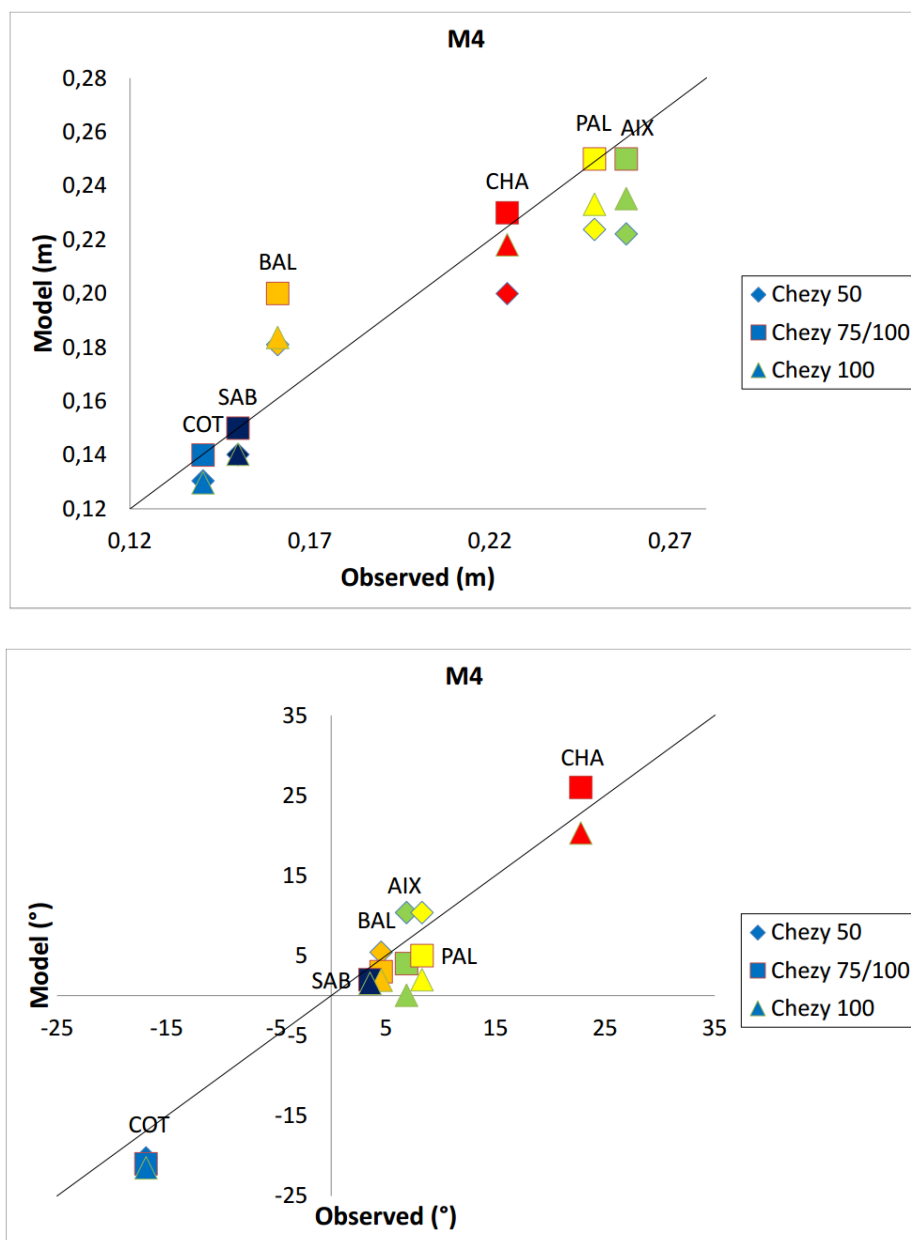


Figure 39 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M4
Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

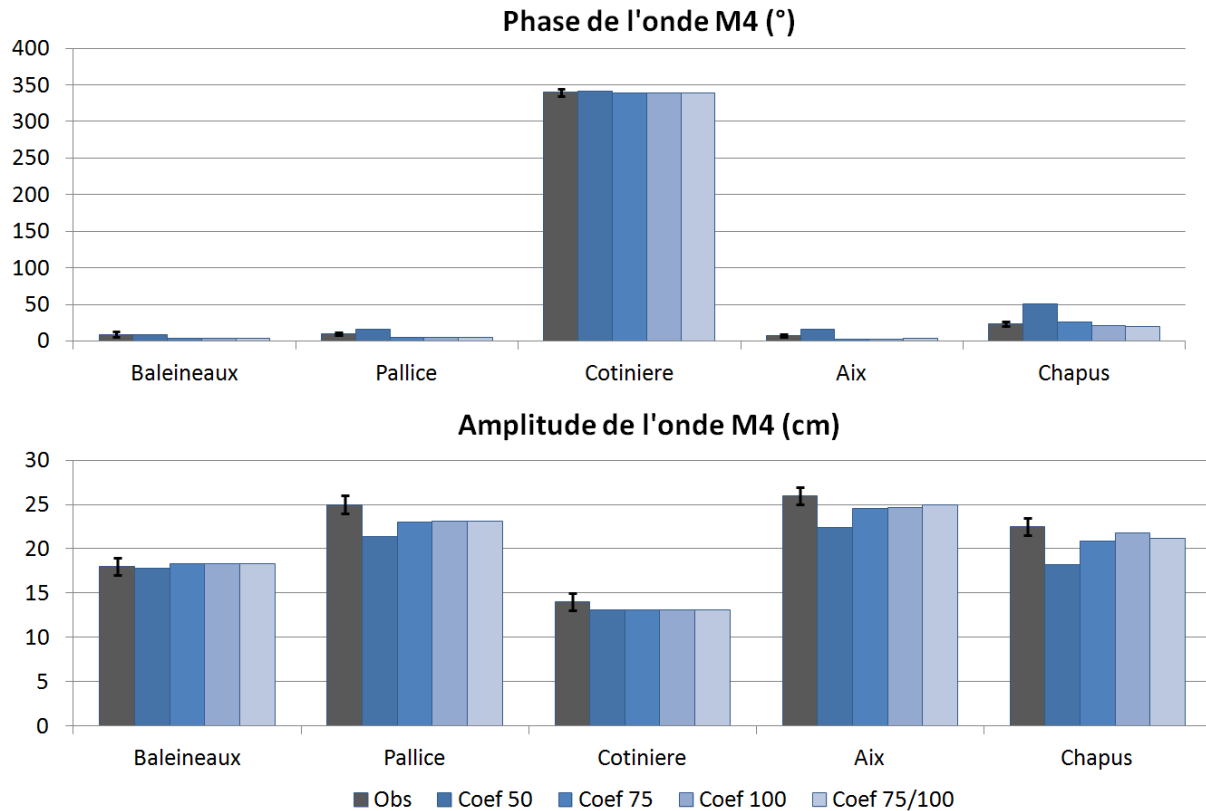


Figure 40: : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M4 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m1/2/Sec$)

Contrairement à M2, le coefficient de frottement variable apporte des changements sur l'amplitude de M4 avec des résultats plus satisfaisants aux Sables d' Olonnes, la Cotinière, le Chapus, la Pallice et l'Ile d'Aix. Seul le site des Baleineaux surestime un peu plus l'amplitude comparé au frottement constant. Les modifications sur la phase sont elles mineures et n'apportent pas de perfectionnement du modèle.

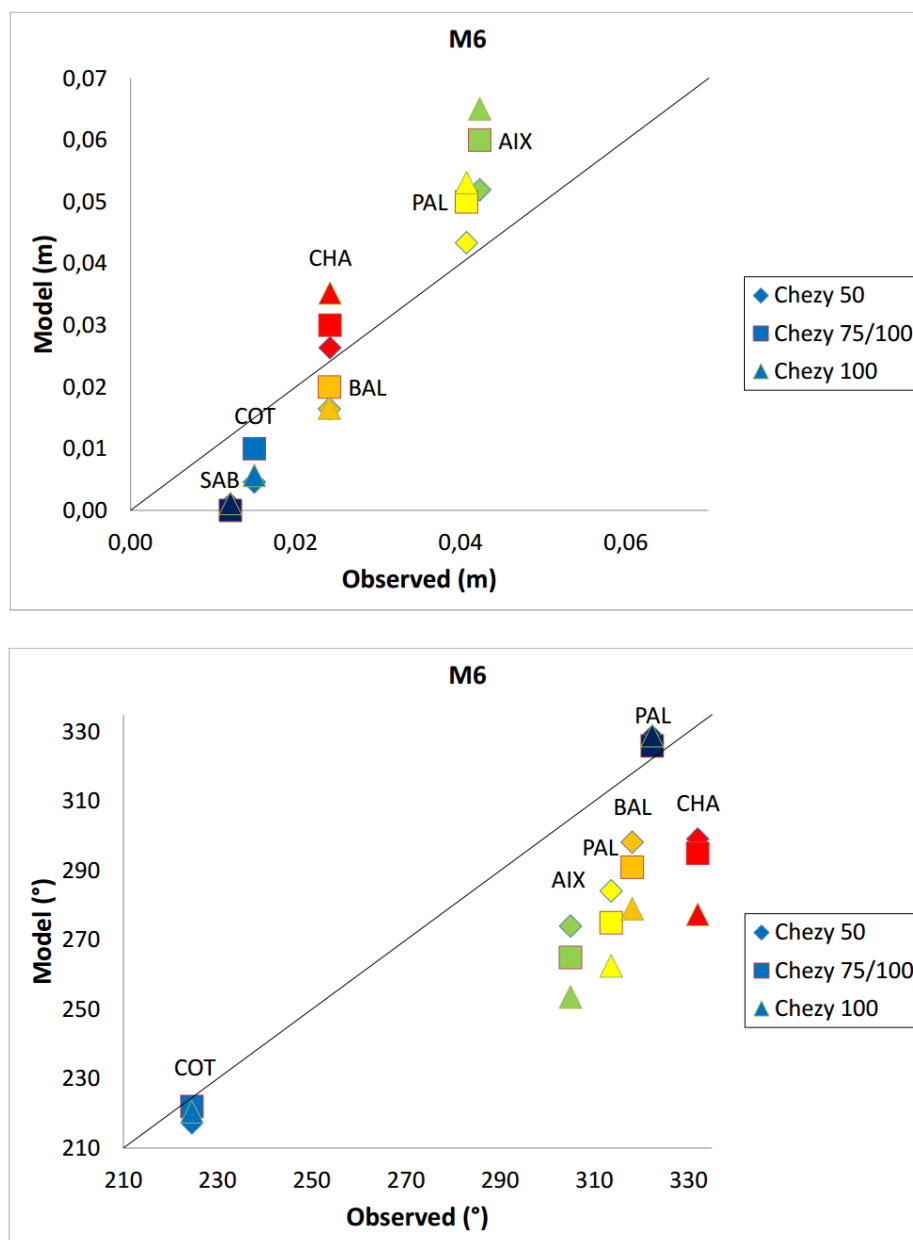


Figure 41 : Comparaisons modèle/observations des amplitudes (m) et des phases (°) pour différents coefficients de frottement uniforme et variable dans le Pertuis Charentais pour la composante tidale M6
Avec COT : La Cotinière, BAL : les Baleineaux, SAB : les Sables D'Olonnes, AIX : l'île d'Aix, PAL : La Pallice et CHA : le Chapus.

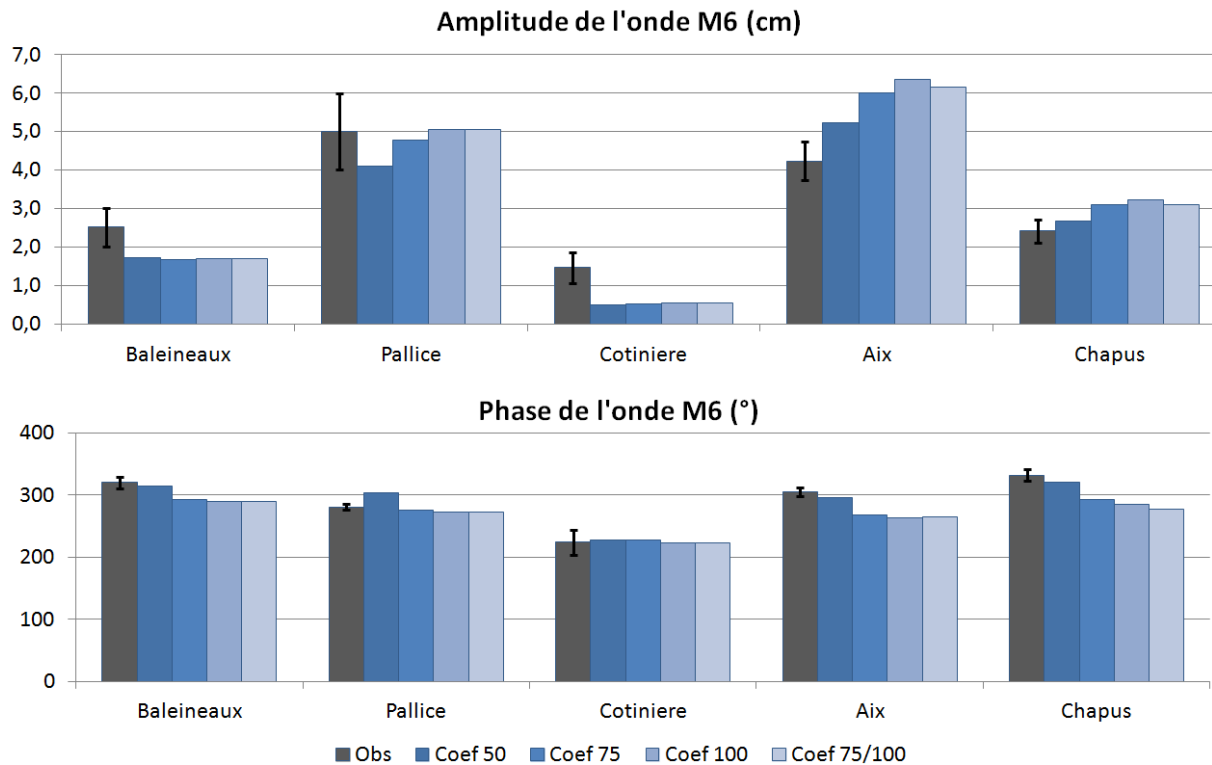


Figure 42 : Comparaisons des Amplitudes (cm) et Phases(°) de l'onde M6 observée dans les Pertuis Charentais et leurs barres d'erreur, comparées aux valeurs du modèle pour différents coefficients de frottement Chézy ($m^{1/2}/Sec$)

Les valeurs de phase de M6 ont toutes été sensiblement améliorées comparé au modèle de frottement constant $75 m^{0.5}/s$. Mais la différence entre les deux modèles est faible. Les changements sur l'amplitude sont très mineurs avec des résultats moins satisfaisant sur les marégraphes.

Un tableau récapitulatif regroupant les amplitudes et phases des principales harmoniques de marées calculées par le modèle pour les différents sites marégraphiques répertoriés dans le Chapitre II est présenté :

Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100		Coef 75/100	
M2	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}
Ile d'aix	4,3	0	3,9	2	3,7	3	3,8	0
La Pallice	0,5	1	0,8	2	0,8	3	0,6	0
Le chapus	0,6	1	0,2	1	0,6	3	0,0	1
Baleineaux	4,1	2	4,3	3	4,4	3	4,2	1
Sables D'Olonnes	1,1	3	1,2	3	1,2	3	0,7	0
La cotinière	0,1	2	0,1	2	0,2	2	0,3	0
E2	1,8	2	1,7	2	1,8	3	1,6	1
Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100		Coef 75/100	
M4	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}
Ile d'aix	3,6	3	2,7	3	2,3	7	0,8	3
La Pallice	2,5	2	1,9	3	1,6	6	0,1	3
Le chapus	2,5	15	1,3	4	0,7	2	0,5	3
Baleineaux	2,0	1	2,2	1	2,3	3	3,9	2
Sables D'Olonnes	1,0	2	1,0	2	1,0	2	0,0	2
La cotinière	1,0	3	1,0	4	1,1	5	0,0	4
E2	2,1	4	1,7	3	1,5	4	0,9	3
Marégraphe	Coef 50		Coef 75		Coef 100		Coef 75/100	
M6	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}	A _{mod}	φ _{mod}
Ile d'aix	1,0	31	1,6	44	2,3	51	1,8	40
La Pallice	0,3	29	0,7	43	1,2	51	0,9	39
Le chapus	0,2	33	0,6	47	1,1	55	0,6	37
Baleineaux	0,8	20	0,8	31	0,8	39	0,4	27
Sables D'Olonnes	1,1	6	1,1	7	1,1	7	1,2	4
La cotinière	1,0	7	1,0	5	0,9	4	0,5	3
E2	0,7	21	1,0	30	1,2	34	0,9	25

Tableau 14 : Ecart moyen absolu des ondes M2, M4 et M6 en Amplitudes (cm) et phases(°) aux différents marégraphes

Ce nouveau maillage incluant un frottement variable 75/100 apporte une amélioration générale sur la phase de M2 que sur l'amplitude de M4. L'erreur RMS quand à elle tombe à 13 cm comparée à 15 cm pour le coefficient constant 75 m^{0.5}/s. Les lignes d'eau ont ensuite été confrontées une nouvelle fois à la ligne d'eau observée avec le frottement variable (Figure 43).

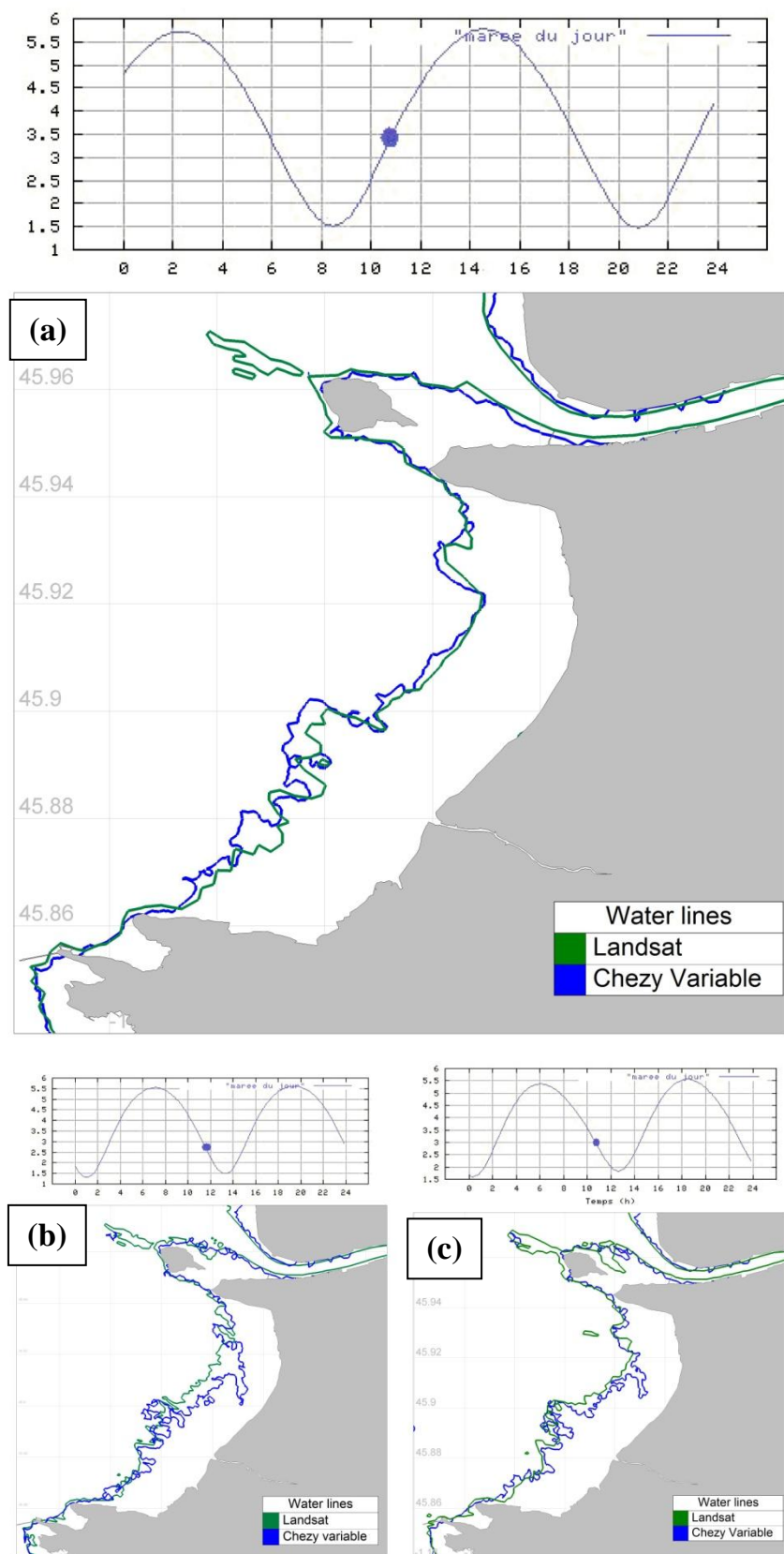


Figure 43 : Hauteur d'eau prédite à la Pallice, ligne d'eau observée et lignes d'eau du modèle avec un coefficient de Chézy variable. Les images satellite ont été acquises le (a) 5 mai 2001 à 10 :43, le (b) 14 juillet 1994 à 11 :24 et le (c) 21 juillet 2000 à 10 :45.

Marée montante (a): La ligne d'eau modélisée reprend bien les contours de la ligne d'eau observée. Le retard noté sur les précédents résultats avec frottement uniforme a disparu. Le banc découvrant à l'ouest de l'île Madame a quant à lui disparu et n'est pas représenté.

Marée descendante (b et c): les lignes d'eau sont convenablement représentées pour l'image (c) et prennent bien en compte la forme de la ligne observée sans retard. En revanche, on observe toujours une zone que la ligne d'eau modélisée n'arrive pas à rejoindre pour (b).

Finalement, les résultats sont meilleurs sur l'ensemble des lignes. Les erreurs sur le décalage des lignes par rapport au coefficient uniforme ont disparu et les résultats se rapprochent d'une ligne d'eau avec un coefficient uniforme de 100.

Validation du modèle de marée

Les mesures marégraphiques ainsi que les positions des lignes d'eau nous ont permis de vérifier la robustesse du modèle. Pour appliquer ce modèle au transport des méduses, une nouvelle étape est nécessaire afin de valider le modèle dans ce sens. C'est pourquoi le modèle doit être comparé aux mesures de vitesses *in situ* apporté par les ADCP

1. Mesures ADCP

Le profileur acoustique ADCP mesure les variations des vitesses de courants en 3 dimensions mais nous allons nous focaliser sur les vitesses moyennées sur la profondeur. Nous comparerons ces vitesses moyennes obtenues par J-Y Stanisière sur plusieurs emplacements dans les Pertuis (Figure 44) avec les vitesses simulés par le modèle 2D calibré précédemment par les mesures marégraphiques et les images satellites. Ainsi les simulations numériques 2D lancées sur les périodes correspondantes aux mesures des courantmètres sont ensuite confrontées aux données des ADCP.

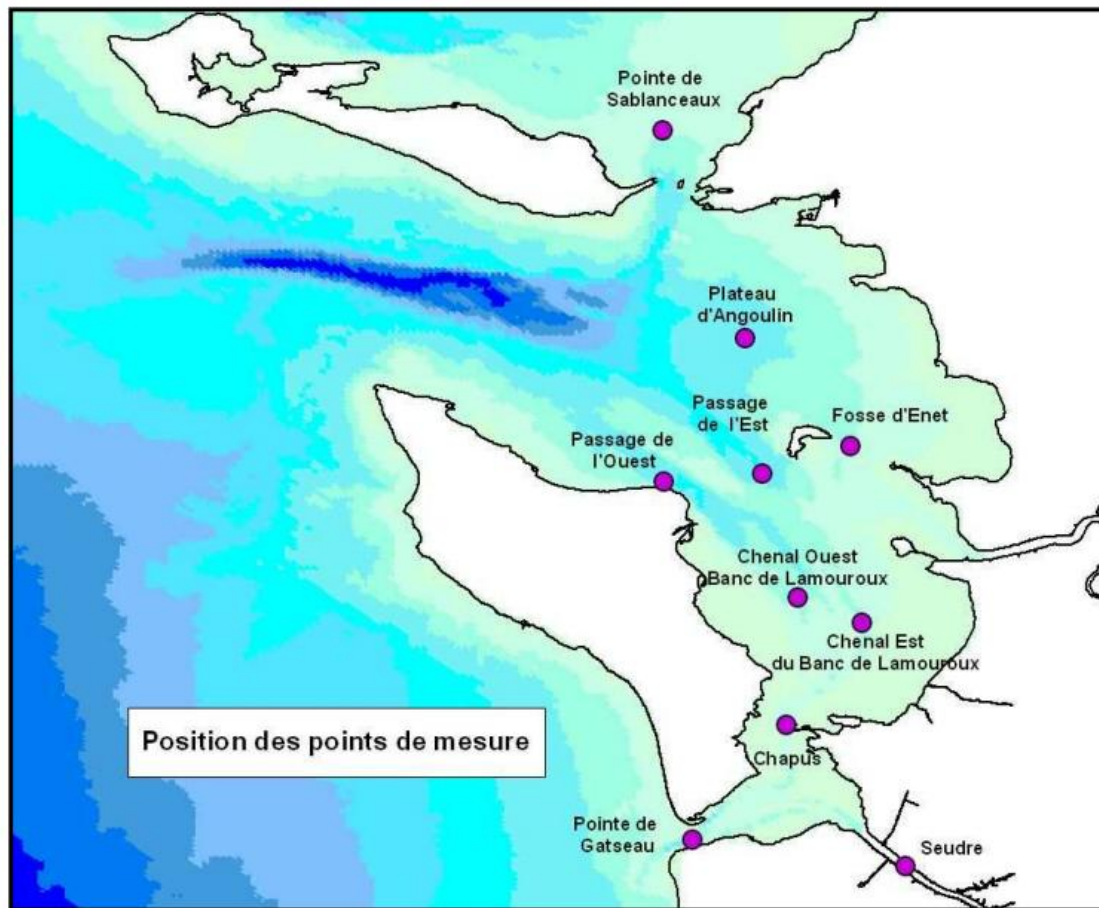


Figure 44 : Positions des mesures courantométriques avec ADCP dans les Pertuis Charentais (Stanisiere et al., 2006)

Nous donnerons ici les variations au cours du temps de la composantes zonale, U , et la composantes méridionale, V , des vitesses de courant, toutes les deux moyennées sur la hauteur d'eau. Les données ADCP sont présentées comme sur les figure suivantes (Figure 45- Figure 53).

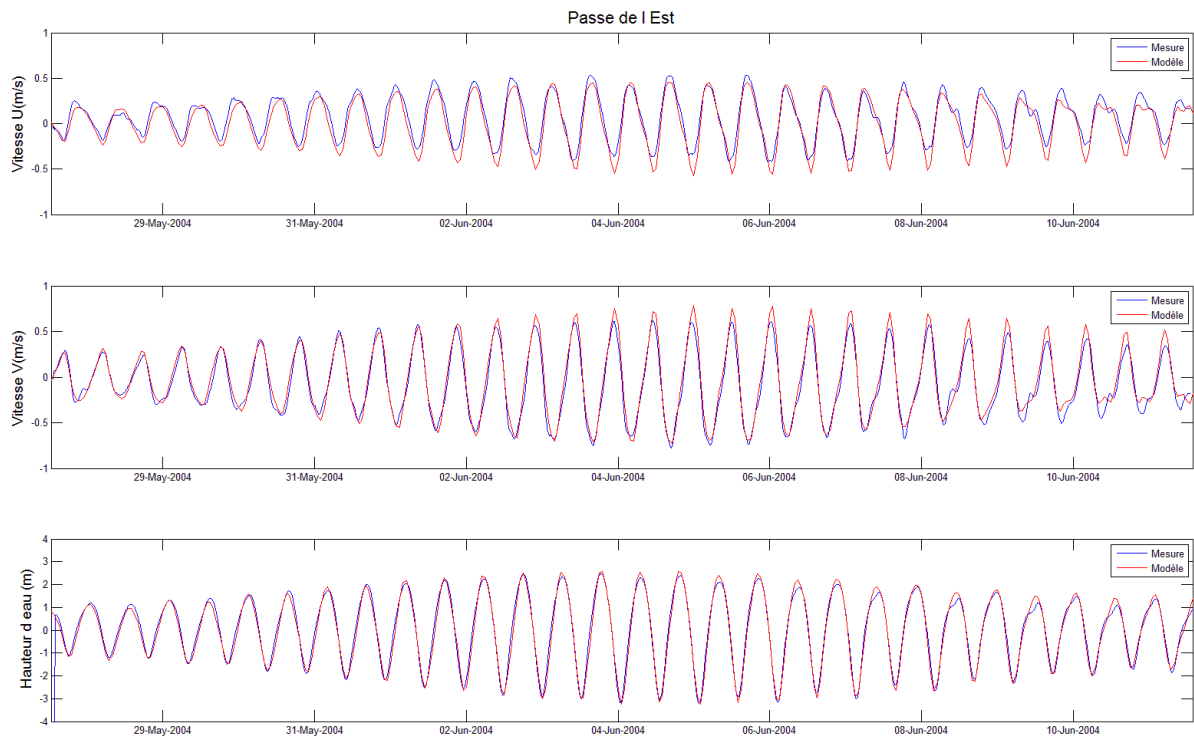


Figure 45: Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Est

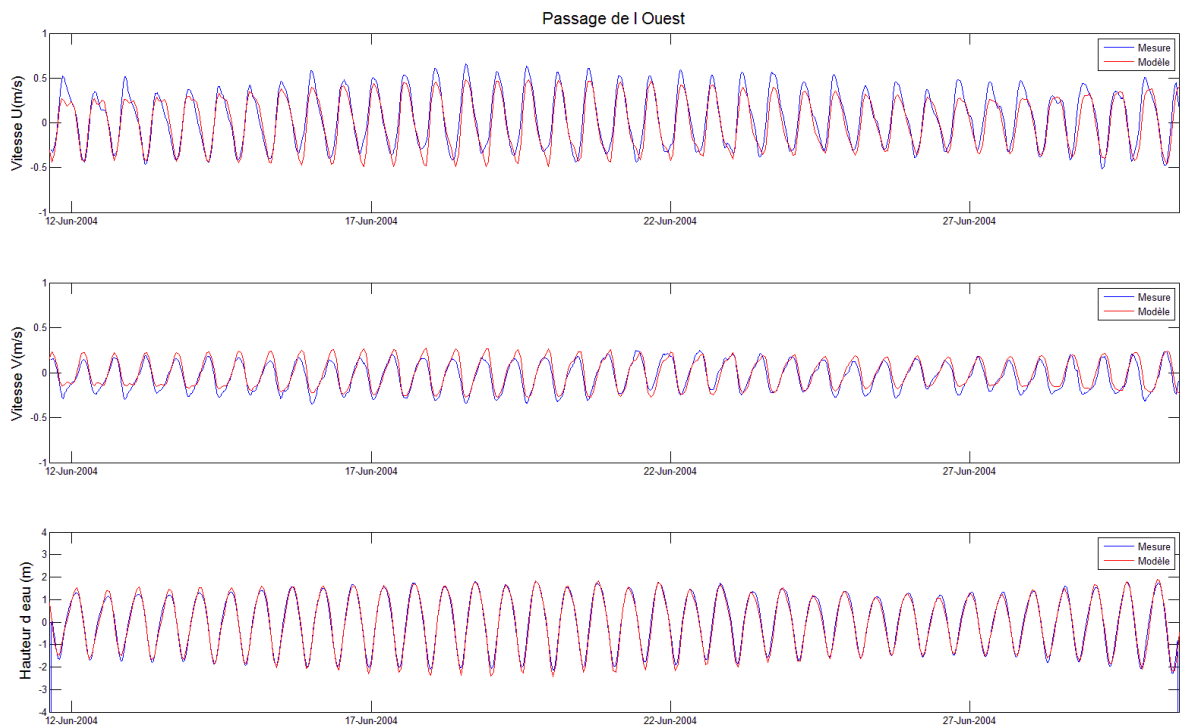


Figure 46 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Ouest

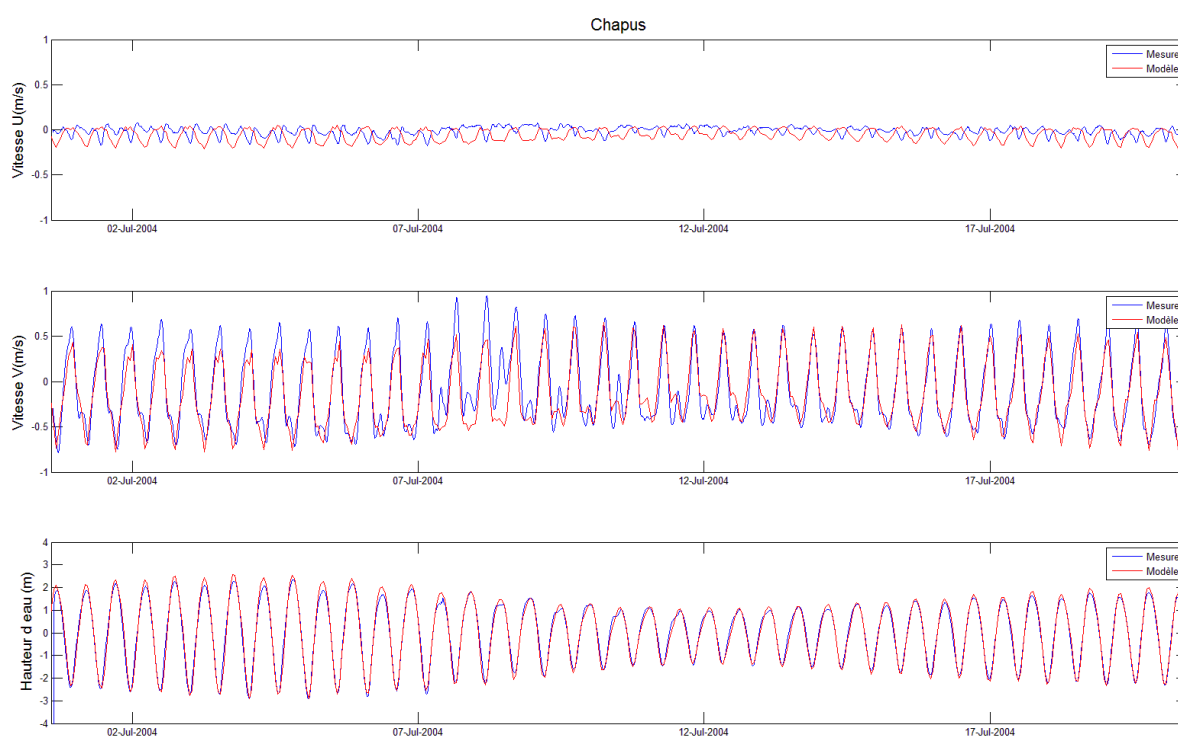


Figure 47 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chapus

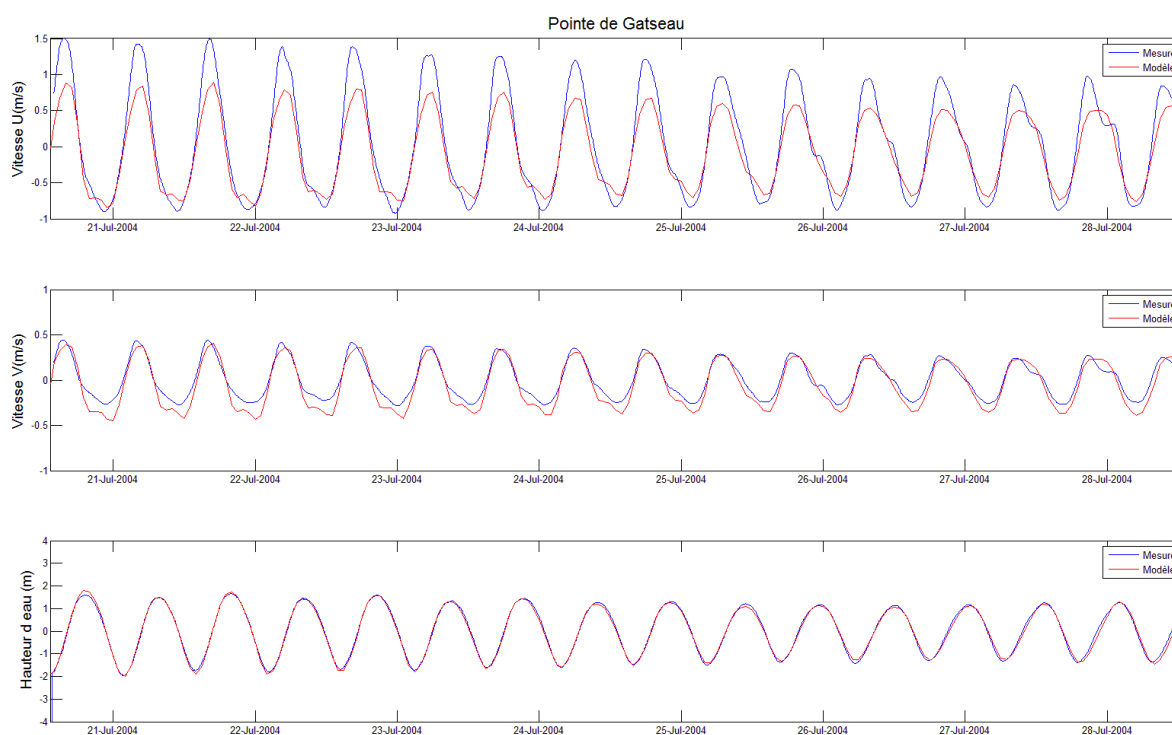


Figure 48 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées à la pointe de Gatseau

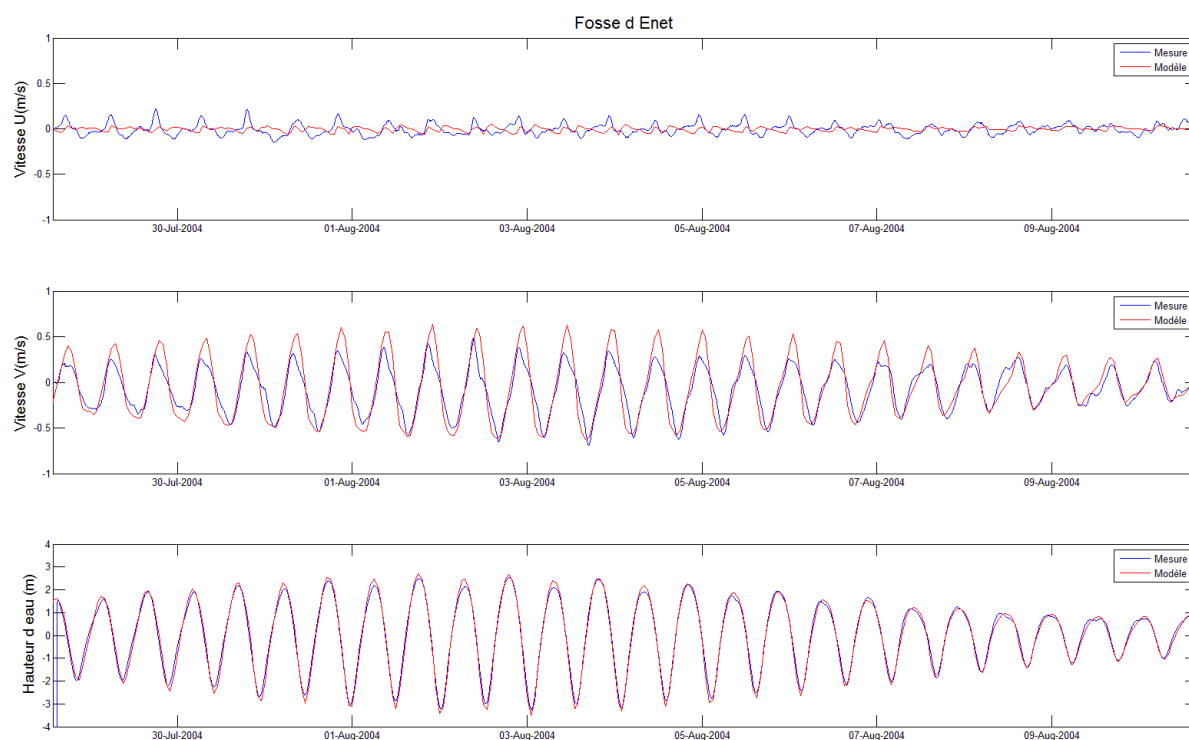


Figure 49 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées dans la fosse d'Enet

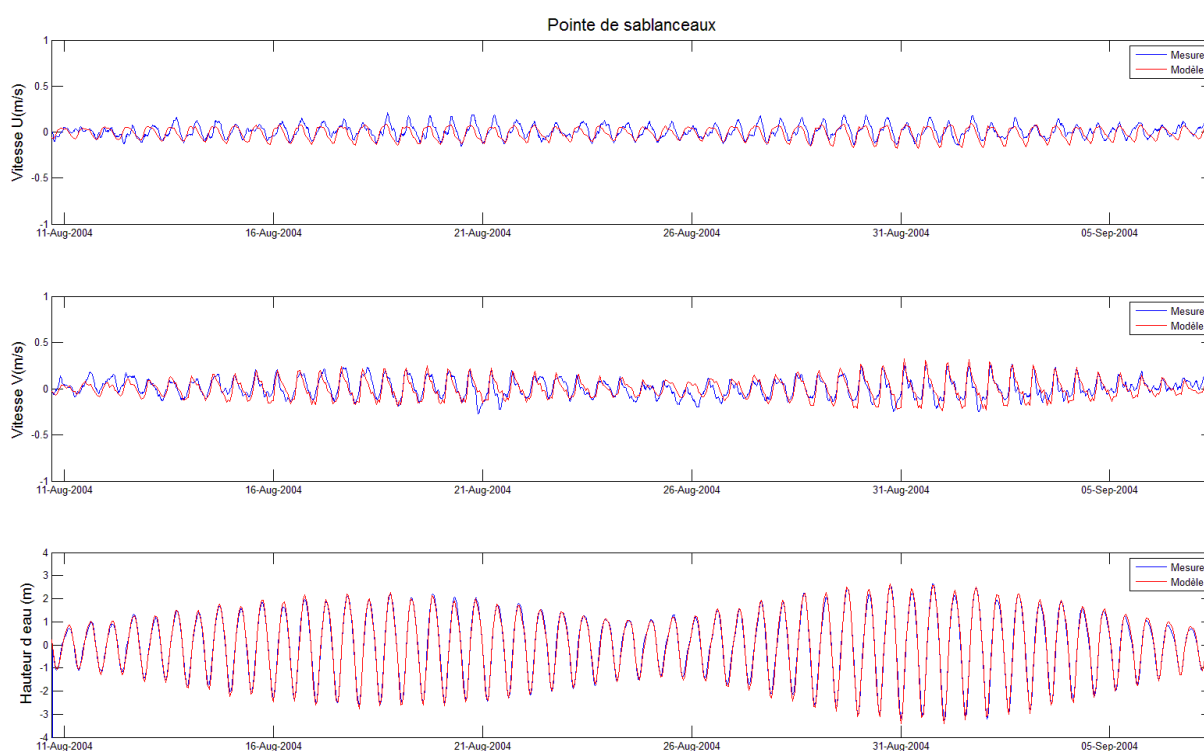


Figure 50 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées à la pointe de Sablanceaux

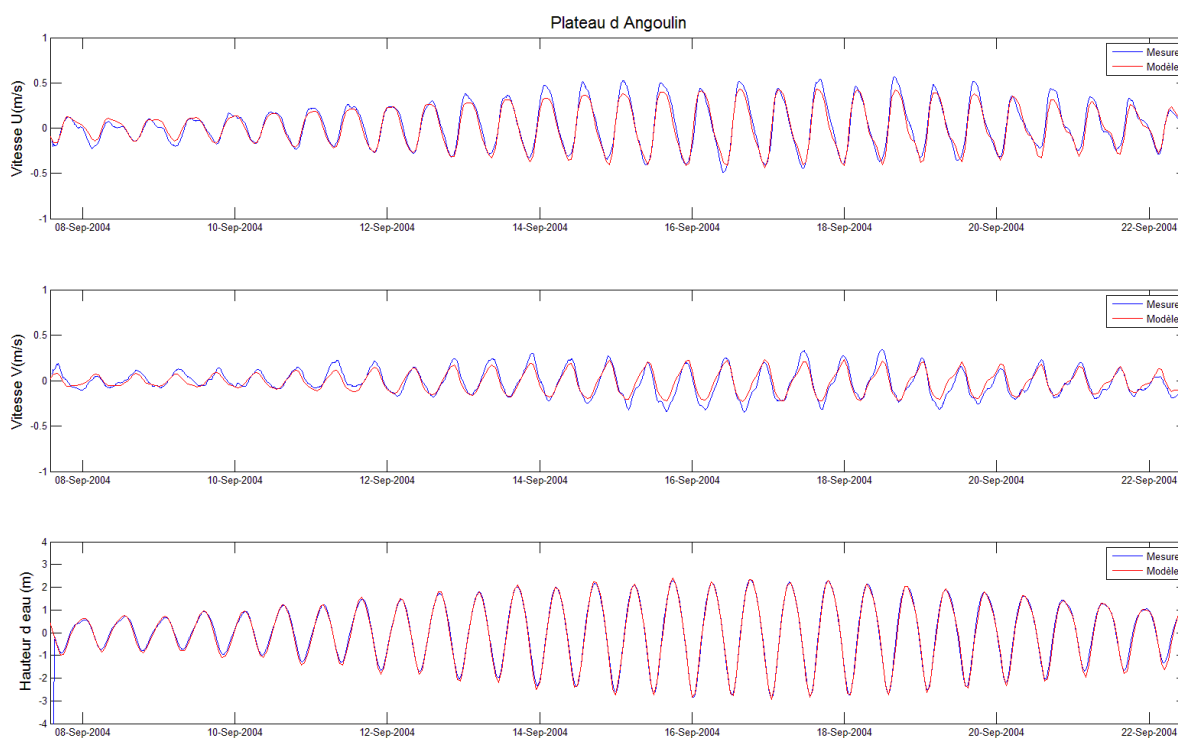


Figure 51 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées sur le plateau d'Angoulin

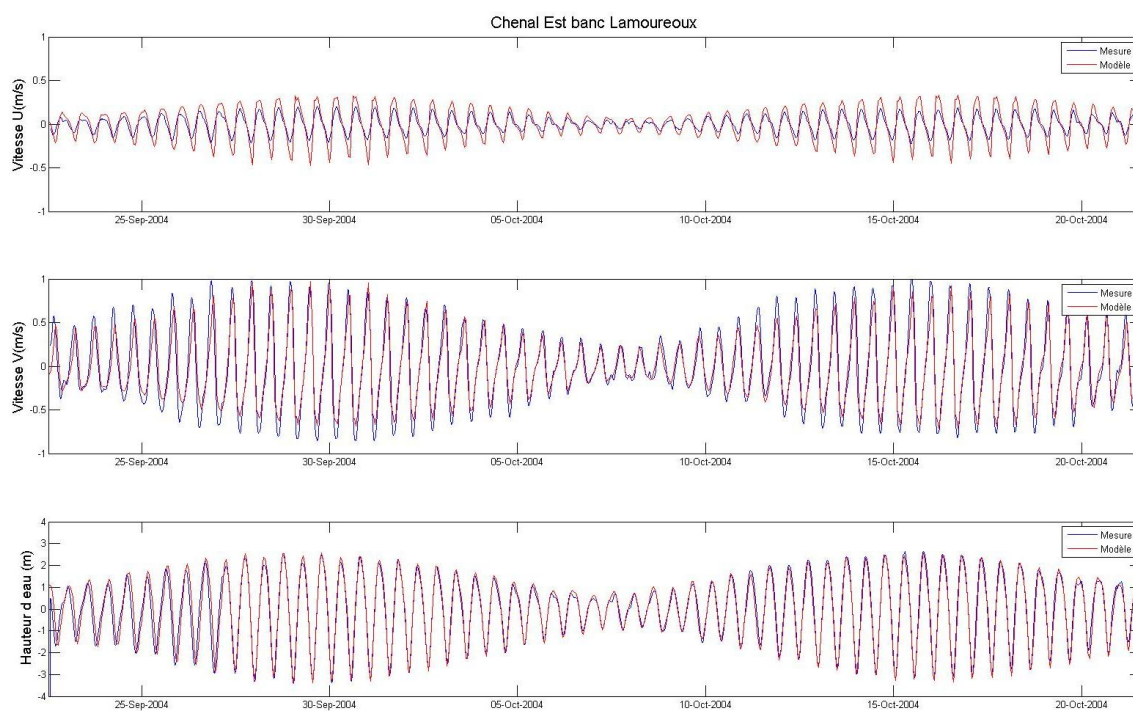


Figure 52 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Est du banc de Lamoureux

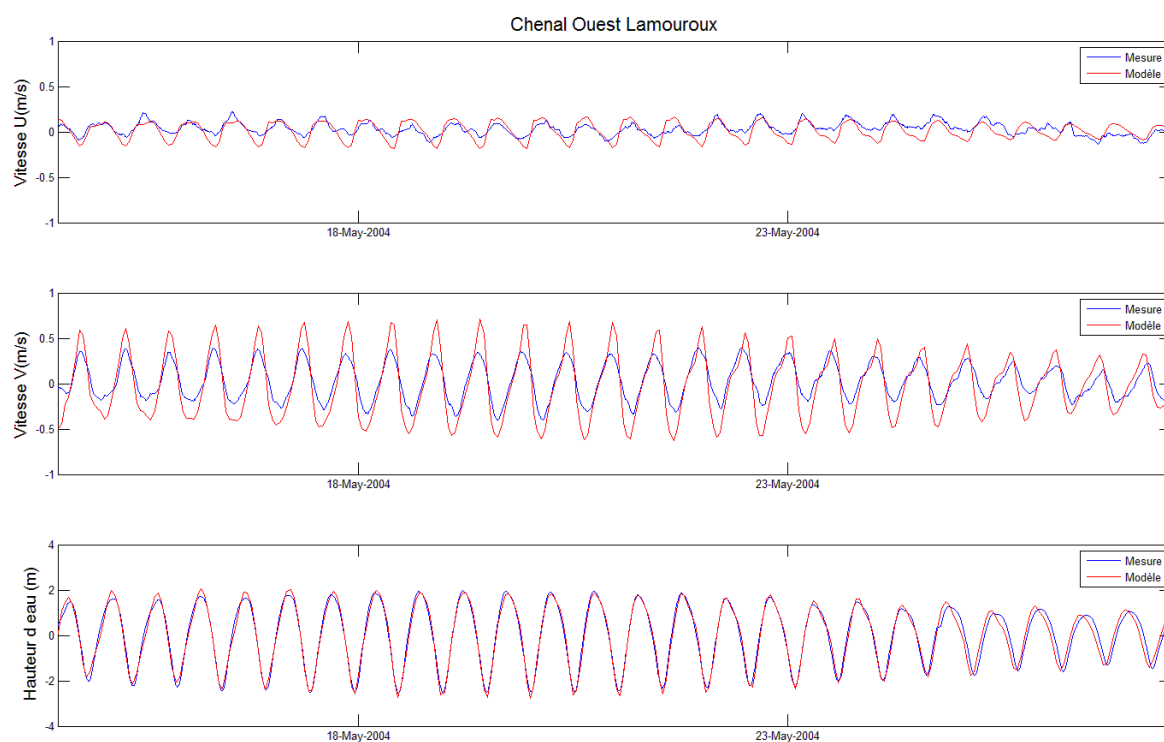


Figure 53 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Ouest du banc de Lamouroux

Hauteur d'eau

Sur les périodes d'enregistrements des capteurs ADCP, le modèle représente le signal de marée avec satisfaction. L'ensemble des points de mesure correspondent à la marée mesurée, la phase et l'amplitude de marée représentées par le modèle sont fidèlement reproduites.

Vitesses

Les résultats sont divisés en deux catégories : les courantomètres situés à l'intérieur de la Baie de Marennes-Oléron et ceux situés à l'extérieur.

L'ensemble des capteurs situés à l'extérieur de la Baie de Marennes-Oléron inclut la pointe de Sablanceaux, le plateau d'Angoulin et les passages Est et Ouest. Les moyennes des vitesses sur la colonne d'eau dans les deux directions, U et V, sont bien représentées, aussi bien lors des minimums de vitesses qui sont observés juste après la pleine mer et juste avant la basse mer, que pour les vitesses maximums. Les variations d'intensité des vitesses de courant dépendent quant à elles du moment du cycle de marée vive eau/morte eau. Les directions sont elles aussi généralement satisfaisantes. On notera dans certains cas un manque d'homogénéité des vitesses et des directions lors des étales.

Pour le cas des capteurs situés dans la Baie, à la fosse d'Enet et dans les chenaux Est et Ouest de Lamouroux, les vitesses ne sont pas aussi bien représentées. Les écarts d'intensité les plus importants sont observés sur les vitesses méridionales V, en période de flot et de jusant. En période de morte eau, les écarts s'amenuisent. Les vitesses aux Chapus, situé dans la baie, sont très différentes. On observe un phénomène intéressant d'un rebond de vitesse, particulièrement pour V, après chaque marée haute en période de déchet. Ces pics de vitesses ne sont pas du tout représentés par le modèle. Cependant, les vitesses redeviennent convenables en période de revif. La vitesse U est, elle, beaucoup plus faible et est assez mal représentée. La pointe de Gateau est un cas particulier car situé en plein dans le Pertuis de Maumusson, qui est une zone soumise à de forts courants. Le modèle sous-estime les pics de vitesse en composante zonale U lors du flot sur l'ensemble de la période d'observation. À l'inverse, les vitesses en V sont surestimées lors du jusant.

Analyse

Nous pouvons dire que la représentation de la hauteur d'eau est clairement satisfaisante pour l'ensemble des points d'observations. En revanche, les vitesses de courants restent plus mitigées, avec une bonne représentation des vitesses par le modèle en dehors de la Baie de Marennes-Oléron et des résultats plus disparates dans la Baie. La raison avancée est

que l'extérieur de la Baie n'est pas influencé par le frottement ; les fonds restent profonds. Lorsque l'onde de marée arrive dans la Baie où les fonds sont peu profonds, la représentation des vitesses des courants par le modèle est surévaluée.

En conclusion, le modèle tidal représente avec satisfaction la marée sur l'ensemble des points de mesures ainsi que les vitesses dans les zones à l'extérieur de la Baie de Marennes-Oléron, ce qui montre la précision de ce modèle.

Applications du modèle de marée

1. Cartographie des durées d'émersion

Les temps d'émersion des estrans intertidaux est un paramètre importants des modèles écologiques (Struski, 2005). L'estimation de temps d'émersion à partir d'un modèle tidal calibré par le biais des positions des lignes d'eau est plus précise que celle basé sur un modèle contraint par des marégraphes situés hors de la zone d'étude. La figure suivante montre le temps d'immersion des estrans de la Baie de Marennes-Oléron pour la marée avec un coefficient 75. D'une façon qualitative la carte est semblable à celle obtenue par Struski (2005). La différence entre la Figure 54 et la carte de Struski est due principalement à la plus haute résolution que des données bathymétriques acquis récemment par le système LIDAR que nous avons utilisées dans le modèle.

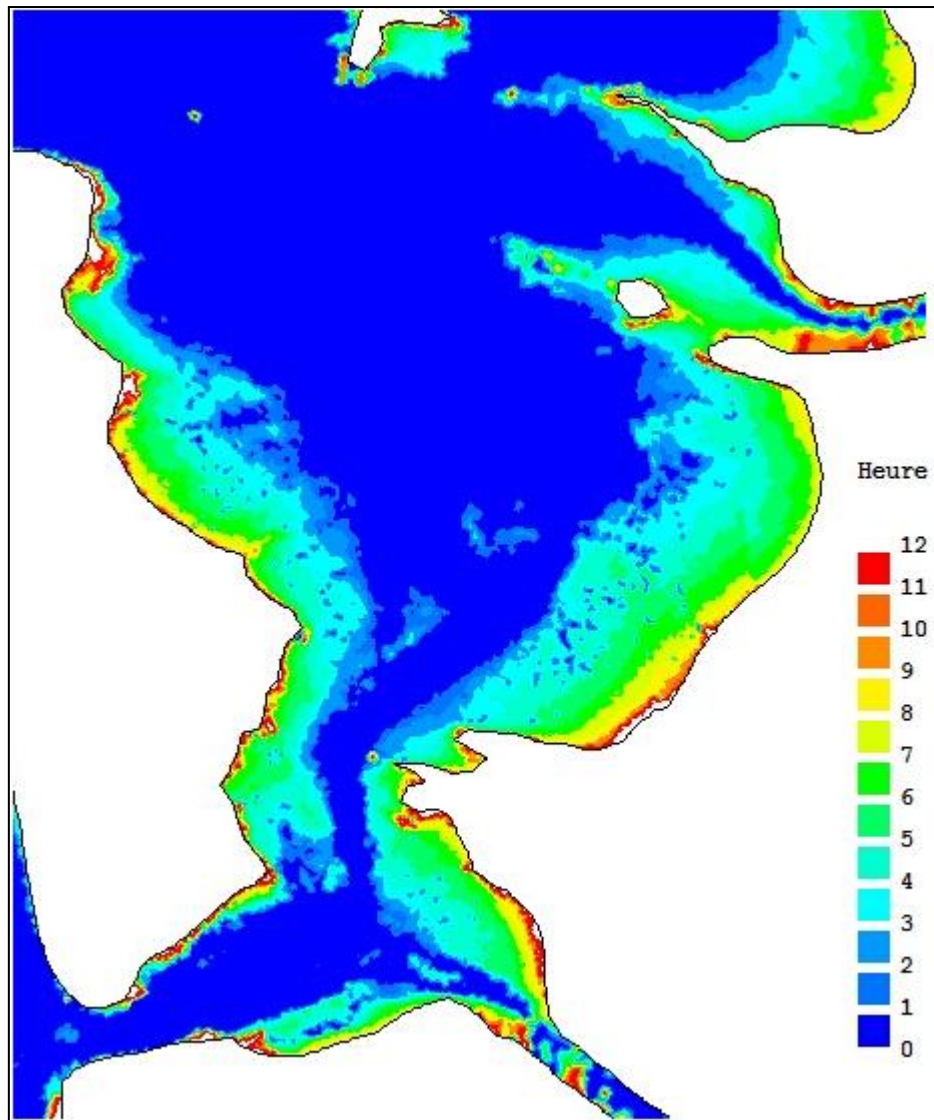


Figure 54 : Durées d'une émigration (en heures) de la Baie de Marennes-Oléron pour un coefficient de marée 75.

2. Temps de renouvellement des Pertuis Charentais

Le temps de renouvellement caractérise l'efficacité du mélange et de l'évacuation des eaux par des courants. Dans les Pertuis Charentais, ce sont les courants tidaux qui contrôlent le transport hydrodynamique mais leur effet peut être fortement modulé par les courants dû au vent (Stanisiere et al., 2008). Pour obtenir les estimations du temps de renouvellement avec le modèle présenté ci-dessus nous avons réalisé. Plusieurs simulations ont été réalisées pour estimer le temps de renouvellement global des Pertuis Charentais. Trois zones correspondantes aux trois bassins ont été retenues (Figure 55) : le Pertuis Breton, le Pertuis d'Antioche et la Baie de Marennes-Oléron. Les zones ont été délimitées comme décrites dans le chapitre I. Le cycle de marée est en période de déchet avec un coefficient de marée faible (51).



Figure 55 : Limite retenue des Pertuis Breton, d'Antioche et de la Baie de Marennes-Oléron pour le calcul des temps de renouvellement.

L'effet du vent a été testé sur les temps de renouvellement des Pertuis Charentais. Les vents moyens fictifs déterminés à 4 m/s constant ont été testés. Le vent est appliqué sur l'ensemble du domaine est constant et homogène. Le temps de renouvellement global moyen calculé par chaque zone et direction de vent est résumé dans le Tableau 15.

Zone	Vent	Temps de renouvellement (en jours)	Temps de renouvellement moyen (en jours) (Stanisière)
Baie de Marenne Oléron	Nul	11	12
	E	10,5	10 < t < 14
	O	11,0	10 < t < 14
	N	10,5	10 < t < 14
	S	11,0	10 < t < 14
Pertuis Breton	Nul	93	85
	E	40	30 < t < 140
	O	48	30 < t < 140
	N	95	30 < t < 140
	S	23	30 < t < 140
Pertuis d'Antioche	Nul	80	104
	E	80	25 < t < 180
	O	21	25 < t < 180
	N	110	25 < t < 180
	S	17	25 < t < 180

Tableau 15 : Temps de renouvellement avec un vent moyen, selon la direction du vent. Comparé au temps de renouvellement des Pertuis Charentais par Mars 2D (Stanisière et al., 2008)

Globalement, le vent est un facteur ayant peu influence sur le temps de renouvellement de la Baie de Marennes. Les résultats obtenus indiquent que le temps de renouvellement varie légèrement suivant la direction du vent, entre 10 et 11 jours. L'eau de la Baie de Marennes

d'Oléron s'écoule principalement par le Pertuis de Maumusson qui est très étroit, ceci explique la faible différence observée entre les cas de vent.

Le Pertuis Breton a un temps de renouvellement très important, comme il était attendu dans la littérature. Le temps de renouvellement estimé est de 93 jours alors qu'il est de 85 pour mars 2D. Par vent de Nord, son temps de renouvellement n'est pas impacté contrairement aux autres directions du vent qui font passer son temps de renouvellement de 48, 40 et 23 jours pour un vent d'est, ouest et Sud respectivement. Les résultats concordent avec les estimations de variations du temps de renouvellement moyen entre 30 et 140 jours obtenues avec Mars 2D.

Le temps de renouvellement du Pertuis d'Antioche est sous-estimé comparés aux résultats de Mars 2D, avec 80 jours contre 104 jours. Par vent d'est le temps de renouvellement reste inchangé, tandis qu'un vent de nord augmente le temps de résidence de 80 à 110 jours. Le Pertuis d'Antioche est également affecté par le vent d'ouest et sud avec un temps de renouvellement qui passe à 21 et 17 jours. Ces temps de renouvellement sont inférieurs au minimum estimé par Mars2D qui est de 25 jours.

Discussion

Les modèles en deux dimensions basés sur les équations hydrodynamiques de la marée en milieu peu profond sont aujourd'hui bien connus et habituellement utilisés dans les études d'océanographie côtière. Le modèle construit dans cette thèse fait partie des modèles tidaux bidimensionnels qui simulent les variations du niveau de la mer et les courants moyennés sur la profondeur. Tout d'abord, notre modèle a été calibré par les mesures marégraphiques en supposant que le coefficient du frottement au fond est uniforme dans les Pertuis Charentais. Nous avons constaté une difficulté à amener en concordance les amplitudes et les phases de M2, M4 et M6 modélisées avec les observations, comme cela avait été remarqué par Nicolle et Karpytchev (2007) pour le Pertuis Breton. Une solution de compromis pour le modèle avec le coefficient de frottement uniforme consiste à choisir un coefficient de Chézy autour de $C = 70\text{--}75 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Il est à souligner que la modification du coefficient de Chézy ne change guère l'écart-type entre le niveau de la mer prédit par le modèle et celui observé durant l'année 2001 : l'écart-type varie entre 14 et 15 cm pour un coefficient de Chézy entre 50 et $100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Ceci explique en partie pourquoi le coefficient de frottement variable en espace est rarement utilisé dans les modèles pour les Pertuis Charentais (Macur, 1999; Boutier et al., 2000; Bertin et al., 2012).

Le modèle de marée a été soumis à la méthode de calibration dite des lignes d'eaux dans la Baie de Marennes-Oléron. L'article « Calibration of coastal tide models by satellite imagery » soumis à Continental Shelf Research (Annexe C), en présente les résultats. La variante la plus répandue de cette approche, aussi connue sous le nom de « Waterlines method », utilise en général un modèle de marée déjà calibré pour estimer le mouvement de la ligne d'eau dû aux marées. Après une série de tests, nous avons estimé que les lignes d'eaux

observées en 2000 et en 2001 sont plus proches des prédictions avec un modèle utilisant $C = 100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Notons également que l'écart-type entre le niveau de la mer observé et celui prédit par le modèle avec contraste de frottement est passé de 14 - 15 cm, pour les modèles avec frottement uniforme, à 13 cm. Cette amélioration, bien qu'apparemment négligeable, s'est montrée conséquente sur les résultats des lignes d'eaux avec des retards du front de mer simulé allant jusqu'à 25 minutes pour l'écart maximum sur la baie de Brouage par rapport aux observations. Le modèle avec un contraste de frottement donne des résultats concordant à la fois avec les mesures marégraphiques et avec les positions de la ligne d'eau. Par conséquent, le modèle avec deux coefficients de frottement $C = 75/100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ a été retenu comme modèle de travail.

Il est important de souligner que la méthode de calibration des modèles tidaux avec la position des lignes d'eaux nous renseigne sur l'évolution de la topographie des zones intertidales. Ainsi, l'écart entre la position de la ligne d'eau simulée et observée est beaucoup plus important sur l'image de 1994 que sur les images de 2000 et 2001. Ceci laisse à supposer des changements décennaux de la topographie des vasières dans la Baie de Marennes-Oléron. En effet, l'application du modèle tidal est passée par l'intégration de nombreuses données d'observations ou de simulations. Les données bathymétriques utilisées proviennent de sources diverses à des époques différentes, pour lesquelles ne sont pas utilisés les mêmes systèmes de géoréférencement, ni les mêmes méthodes de collecte. Les outils mis à disposition pour générer des MNT avec différentes sources sont aujourd'hui courants et leurs résultats sont fiables. Cependant, les zones côtières subissent de rapides changements bathymétriques, notamment au niveau du transport des sédiments fins. Une bathymétrie en accord avec la période étudiée est nécessaire. Les données bathymétriques au large sont quant à elles moins sujettes à ces changements rapides. Les résultats à petite échelle avec la méthode de la ligne d'eau montrent les limites d'une bathymétrie non adaptée à la période étudiée.

Les tests de sensibilité du modèle hydrodynamique à la variation du coefficient de Chézy étant concluants, ce modèle a été validé par le biais de 9 mesures courantométriques dans les Pertuis Charentais. Les résultats sont rassemblés sous forme de comparaisons entre la composante zonale U , la composante méridionale V , et la hauteur d'eau. Les résultats montrent une bonne réponse du modèle sur la hauteur d'eau mais présentent quelques faiblesses quant à la restitution des composantes U et V dans les chenaux de la Baie de Marennes-Oléron. Notons que les différences entre les prédictions du modèle et les mesures de terrain peuvent s'expliquer par plusieurs limitations. La bathymétrie, bien que précise, a été interpolée et, dans le modèle, n'est pas actualisée pour la période des ADCP. Les simulations faites sur les chenaux peuvent être lissées à cause du maillage grossier du modèle dans cette zone. Ceci est d'autant plus vrai dans le système des Pertuis Charentais où l'on assiste à des changements rapides (Bertin et al., 2008). Les ADCP ont enregistré les données sur 15 jours, ce qui donne une idée précise de la nature des courants locaux et permet de tester le modèle sur une période adéquate. D'autres facteurs traditionnels peuvent aussi agir énormément sur la précision du modèle, tels que la précision du signal de marée, l'effet de la variation dans l'espace de la rugosité du fond, les fluctuations météorologiques (coups de

vent, variations locales de la pression atmosphérique,...). Le manque de données dans le Pertuis Breton est préjudiciable à la validation des vitesses des courants du modèle, car il ne permet pas d'affirmer leur bonne restitution dans cette zone.

Le calcul des temps de renouvellement des Pertuis Charentais est une application importante du modèle. Les résultats des temps de renouvellement sont proches de ceux de J.-Y. Stanisiere (2008). Le modèle Mars 2D, en absence de vent, donne un temps de résidence de 12 jours pour la Baie de Marennes-Oléron, de 85 jours pour le Pertuis Breton et de 104 jours pour le Pertuis d'Antioche. Les estimations obtenues avec Telemac sont proches pour la Baie de Marennes-Oléron (11 jours) mais plus éloignées pour les Pertuis d'Antioche (80 jours) et le Pertuis Breton (93 jours). Disposant de peu de mesures *in situ* sur ces deux Pertuis, il est difficile de comparer de manière convenable ces résultats. En plus de montrer l'influence de la marée sur le déplacement des masses d'eau dans les Pertuis, J.-Y. Stanisiere (2008) a démontré que le vent est le premier facteur agissant sur le renouvellement des masses d'eau dans les Pertuis. Les résultats de cette étude montrent une variation du temps de renouvellement des Pertuis Breton et d'Antioche de 70% selon les conditions de vent, ce qui est en concordance avec les résultats obtenus récemment par Stanisiere. Seule la Baie de Marennes voit la contribution du vent beaucoup plus faible sur son temps de renouvellement, comme dans nos résultats.

Le modèle 2D avec un contraste de frottement permet de reproduire correctement les variations du niveau de la mer et les courants moyens dans les Pertuis Charentais. Cependant, la représentation des variations des courants tidaux avec la profondeur et la répartition en profondeur des éléments dissous (salinité, température, matière en suspension) requièrent un modèle 3D. , qui a été développé et appliqué à l'étude des courants dans les Pertuis Charentais. Les premiers résultats de ce modèle sont rassemblés dans l'Annexe B. Ils montrent que le passage à un modèle en 3D dans un milieu en eaux peu profondes et possédant une nature de fond non homogène donne des erreurs importantes dans la prédiction de la marée et de ses courants. De par les nombreuses erreurs dans les prédictions de marée et de courant, il est donc obligatoire, pour un modèle tidal tridimensionnel, de passer par une détermination du coefficient sur le fond variable en espace tenant compte de la nature des fonds et de leur rugosité qui leur est propre.

Les résultats obtenus, même s'ils restent globalement satisfaisants, sont perfectibles. En effet, une paramétrisation du coefficient de frottement en corrélation avec la composition morphologique du fond serait un exercice intéressant sur la réponse de la ligne d'eau et des harmoniques de marée. Des mesures de terrain supplémentaires dans les Pertuis d'Antioche et Breton, en particulier de courants, permettraient de connaître avec précision la réponse du modèle dans ces zones à forts courants tidaux dans le but d'affiner le calage du modèle et de valider avec certitude les trajectoires des traceurs utilisés pour le transport des méduses. Les conditions aux limites peuvent être elles aussi améliorées. Le forçage de la frontière ouverte provenant de FES2010 totalise 16 composantes tidales. En augmentant ce nombre, il est possible d'obtenir une meilleure réponse du modèle, en particulier en réduisant l'écart type entre le niveau de la mer observé et prédit par le modèle. De même, les débits des fleuves sont considérés comme constants durant les simulations. Avec des débits variables dans le temps,

en suivant les saisons, les résultats seraient meilleurs, en particulier dans la Baie de Marennes-Oléron où l'influence de la Charente y est importante (Ravail et al., 1988).

Conclusion

Le calage du modèle hydrodynamique 2D appliqué au Pertuis Charentais a nécessité l'utilisation de données de terrains telles que des données marégraphiques, des vitesses de courants et des images satellites. La calibration du modèle a été accomplie en deux étapes : d'abord par comparaison avec les composantes harmoniques mesurées, puis par la méthode des lignes d'eaux. Les résultats du calage par données marégraphiques donnent pour les Pertuis Charentais un coefficient Chézy $C = 75 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ adéquat pour la modélisation de la marée. La deuxième étape de calibration, à l'aide de la méthode des lignes d'eaux, indique qu'un modèle à frottement variable en espace augmente l'ajustement aux observations en prédisant mieux les positions des lignes d'eaux observées et simulées et réduit les erreurs de phases sur les composantes harmoniques prédites. Une paramétrisation avec une distinction entre la Baie de Marennes-Oléron et le reste du Pertuis a été retenue, avec $C=75 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ pour l'ensemble des pertuis et $C= 100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ pour la baie. Ces valeurs ont été retenues pour valider le modèle hydrodynamique avec les mesures de courants. Les résultats des simulations de courants comparés aux ADCP sur 9 points sont globalement très satisfaisants. Les seules divergences en termes de vitesse des courants concernent la Baie de Marennes-Oléron.

Deux applications directes de ce modèle hydrodynamique sont présentées. La première application « interdisciplinaire » a été la réalisation d'une carte précise du temps d'immersion des vasières dans la Baie de Marennes-Oléron (Figure 54) nécessaire dans les modèles biologiques pour estimer le rayonnement solaire absorbé par le biofilm (projet VASIREMI, (Blanchard et al., 2001)). Le calcul des temps de renouvellement du Pertuis Breton, du Pertuis d'Antioche et de la Baie de Marennes-Oléron est la deuxième application importante du modèle avec des temps de résidence calculés à 93, 80 et 11 jours respectivement. Selon les conditions de vent, intensité et direction, varient jusqu'à 70% : 17 jours dans le Pertuis d'Antioche et 23 jours dans le Pertuis Breton. La Baie de Marennes-Oléron montre la relative insensibilité aux conditions atmosphériques sur le temps de renouvellement de ses eaux.

Dans ce chapitre, nous avons développé et appliqué la méthode des lignes d'eaux qui nous a permis une estimation précise du temps d'immersion durant lequel les vasières de la Baie de Marennes-Oléron sont exposées (Saint-Béat, 2012). La calibration des modèles tidaux par la méthode des lignes d'eaux devrait être considérée comme une technique complémentaire à l'ajustement classique de données marégraphiques. Tandis que les marégraphes fournissent des données continues assez rares et espacées géographiquement, la position de la ligne d'eau contraint les variations du niveau de la mer en espace à des instants du temps. Elle peut être aussi très utile pour estimer la qualité des données topographiques ainsi que le suivi de la bathymétrie des zones intertidales. Poursuivre et développer cette

technique en rassemblant plus d'images satellites nous semble prometteur pour la validation des modèles de marées et l'évolution topographique des zones intertidales.

Une part importante de ce travail de thèse était consacrée au développement d'un modèle hydrodynamique des Pertuis Charentais répondant à l'application du transport des méduses. Globalement, les résultats du modèle sont pleinement satisfaisants, et les prédictions des hauteurs d'eau et des courants sont précises. Il en résulte que le modèle répond aux attentes pour analyser le transport des méduses exposé dans le chapitre suivant.

Chapitre IV. Effet natatoire des méduses sur leur transport et leur dispersion dans les Pertuis Charentais

Introduction

Les méduses sont omniprésentes dans la mer mais elles n'y sont pas réparties d'une façon uniforme. Très concentrées le long des côtes et dans les estuaires (Lilley et al., 2009), les méduses sont souvent rassemblées en « blooms » - des agrégations qui peuvent compter des milliers d'individus. La dynamique des blooms, les causes de leur formation sont des thèmes d'actualité des recherches actuelles en biologie marine (Berline et al., 2013; Moon et al., 2010). Une des questions parmi les plus importantes concerne la nature des processus qui mènent vers la formation des blooms: les agrégations des méduses sont-elles liées exclusivement à la structure des courants marins ? Quelle est le rôle de la nage des méduses dans la formation et la maintenance des blooms ? Ces questions sont étroitement liées au problème d'échouage des méduses. En approchant les côtes, les méduses peuvent provoquer des dégâts importants en bouchant les canalisations des centrales électriques, obstruant les filets des pêcheurs ou en affectant directement l'industrie du tourisme (Richardson et al., 2009).

Les vitesses de nage des méduses sont en général faibles, de l'ordre de quelques centimètres par secondes (Matanoski et al., 2004) par rapport à ceux des courants marins (Graham et al., 2001). Cela, néanmoins, ne signifie pas que l'effet de la nage des méduses sur leur transport par les courants soit négligeable. Les stratégies d'adaptation des espèces marines dont la vitesse de nage est faible sont très diversifiées (Chapman et al., 2011), des larves de poisson, par exemple, ainsi que copépodes peuvent influencer leurs trajectoires en changeant leur profondeur (Albert, 2011). Les blooms jouent un rôle clé dans l'écologie des méduses, étant des sites favorisant leur reproduction et de « défense collective ». Par conséquent, nous pouvons supposer que les méduses auraient avantage à préserver la configuration d'un bloom et ainsi développer des stratégies afin de ne pas être emportées par les courants dans des zones moins favorables ou vers la cote où elles pourraient s'échouer. En effet, quelques études ont démontré que les méduses peuvent nager dans la direction opposée aux courants marins (Graham et al., 2001; Rakow and Graham, 2006; Zavodnik, 1987). En laissant de côté la question comment les méduses, arrivent-elles à développer la capacité de se réorienter contre les courants, nous nous focalisons dans ce chapitre sur les conséquences d'une telle stratégie. Les questions principales que nous posons dans cette étude sont :

- Est-ce que la nage dans la direction opposée aux courants marins affecte le transport et la dispersion des méduses ? Affecte-t-elle ainsi la formation des blooms ?
- Est-ce que l'échouage des méduses varie si elles adoptent un comportement de nage à contre courant ?

Les Pertuis Charentais sont une région propice à l'étude du comportement des méduses. Les rassemblements énormes de *Rhizostoma*, fréquents les mois d'été, sont un problème pour les pêcheurs ainsi que pour les plaisanciers dans les Pertuis Charentais. Le bloom le plus récent observé en 2013 a provoqué l'échouage de *Rhizostoma pulmo* sur les plages de La Rochelle⁸.

Afin d'estimer la relation entre les phénomènes physiques océanographiques et les agrégations de méduses *Rhizostoma pulmo* dans les Pertuis Charentais, nous avons développé dans cette thèse un modèle de transport des méduses en tenant compte de leur vitesse de nage.

Le projet JellyTrack a servi de base expérimentale pour nos simulations numériques. Les suivis des méduses, menés par les chercheurs de l'Université de Swansea au pays de Galles, et principalement menés par Sabrina Fossette en collaboration avec Graeme Hays ont fourni des mesures des vitesses de méduses et leurs trajectoires dans le Pertuis Breton. Leurs objectifs visaient à comprendre comment se forment les agrégations de méduses et comment leurs mouvements sont influencés par les courants et leur propre comportement de déplacements. Les observations de méduses durant l'été 2011 ont été appuyées par des expérimentations avec des bouées dérivantes qui ont permis de valider le modèle du transport de *Rhizostoma* et explorer, ensuite, les conséquences des différents courants de marée et des courants dus au vent sur la dispersion des méduses et leur échouage dans les Pertuis Charentais.

Observations *In situ*

1. Observations des méduses

Les travaux *in situ* ont été effectués entre le 22 août et le 2 septembre 2011 dans le Pertuis Breton par les chercheurs biologistes de l'Université de Swansea (UK). Des survols aériens, ou transects, de la zone du Pertuis Breton et du Pertuis d'Antioche ont été menés afin d'identifier les potentiels blooms de méduses et leur quantité (Tableau 16). Les blooms sont ensuite divisés en plusieurs catégories en fonction du nombre de méduses observées par tranche de 5 minutes de survol ou tous les 7700 m² : inférieur à 10 méduses, de 10 à 50 méduses, de 50 à 100 méduses, de 100 à 500 méduses et, enfin, supérieur à 500 méduses (Figure 56). Les observations sont ensuite comparées à l'étude faite d'avril à septembre 1983 dans les Pertuis (Husson and Fay, 1983). Trois zones principales ressortent des observations historiques ; la plus importante se situe dans le Pertuis Breton, la seconde au Sud de la Rochelle et la dernière le long de la côte Oléronaise côté large. Dans le Pertuis Breton, les observations faites en avion permettent d'identifier trois zones importantes de méduses avec une concentration supérieure à 100 individus par 5 minutes de survol.

⁸ La Rochelle : les méduses débarquent mais elles piquent peu : www.soudouest.fr

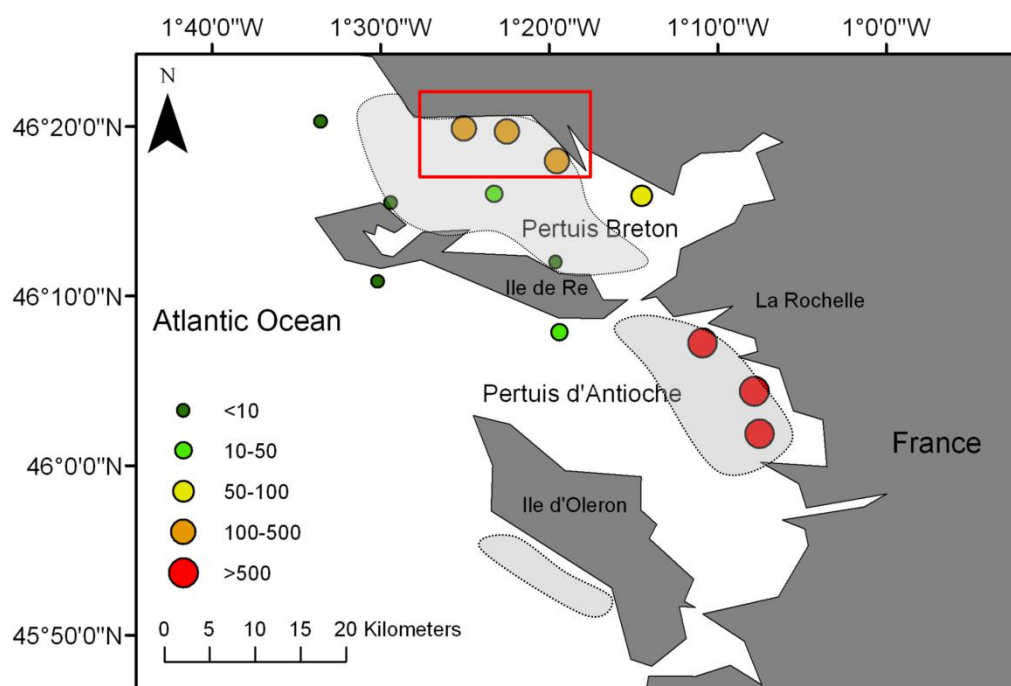


Figure 56 : Distribution spatiale et abondance des méduses *Rhizostoma pulmo* dans le Pertuis Breton et le Pertuis d'Antioche, estimées lors d'un survol aérien le 22 août 2011. Les zones grisées représentent les agrégations de méduses observées en 1983(modifiée de Husson & Fay 1983,)

Numéro de transect	Date	Début (GMT)	Marée	Nombre de méduses observées	Direction de nage des méduses (°)	Direction du courant (°)
					Mean \pm SD (r, p)	Mean \pm SD
1	21/08/2011	10:14:19	Descendante	24	109.1 \pm 57.8° (0.601, <0.01)	-
2	21/08/2011	12:42:06	Descendante	24	36.3 \pm 84.3° (0.339, <0.05)	-
3	21/08/2011	13:34:33	Basse	55	84.4 \pm 95.0° (0.253, <0.05)	-
4	24/08/2011	08:15:23	Haute	46	267.3 \pm 44.6° (0.738, <0.01)	83.3 \pm 0.1°
5	24/08/2011	09:38:24	Haute	15	263.4 \pm 21.7° (0.931, <0.01)	99.1 \pm 4.6°
				13	95.9 \pm 36.3° (0.819, <0.01)	
6	24/08/2011	11:11:09	Haute	55	147.7 \pm 77.1° (0.404, <0.01)	70.0 \pm 11.7°
7	24/08/2011	12:55:12	Descendante	57	95.3 \pm 48.9° (0.695, <0.01)	263.2 \pm 1.7°
8	24/08/2011	14:02:26	Descendante	52	78.4 \pm 32.7° (0.849, <0.01)	266.2 \pm 0.4°
9 S9	25/08/2011	07:22:41	Haute	60	95.6 \pm 52.5° (0.657, <0.01)	79.9 \pm 4.4°
10 S12	28/08/2011	13:21:44	Haute	34	76.4 \pm 43.2° (0.752, <0.01)	96.0 \pm 2.4°
11 S13	29/08/2011	07:26:13	Descendante	20	93.9 \pm 33.5° (0.843, <0.01)	249.5 \pm 0.1°
				10	260.3 \pm 30.1° (0.871, <0.01)	
12 S14	30/08/2011	07:18:25	Descendante	60	88.4 \pm 29.2° (0.878, <0.01)	278.4 \pm 0.1°
13 S15	30/08/2011	08:24:25	Descendante	51	122.2 \pm 91.5° (0.280, <0.05)	278.4 \pm 0.1°
				20	273.3 \pm 39.3° (0.790, <0.01)	
14 S16	30/08/2011	10:09:01	Basse	21	103.8 \pm 40.6° (0.778, <0.01)	226 and 104°
15 S17	30/08/2011	13:43:39	Haute	75	291.9 \pm 79.0° (0.387, <0.01)	125.5 \pm 4.9°
16 S18	01/09/2011	10:37:06	Basse	16	88.7 \pm 27.4° (0.892, <0.01)	93.8 \pm 3.9°
				9	318.7 \pm 23.7° (0.918, <0.01)	
17 S19	01/09/2011	10:59:56	Basse	23	88.1 \pm 30.6° (0.867, <0.01)	93.8 \pm 3.9°
				14	301.6 \pm 42.2° (0.762, <0.01)	
18 S20	01/09/2011	13:58:28	Haute	35	301.2 \pm 73.0° (0.989, <0.01)	110.5 \pm 3.5°
19 S21	01/09/2011	15:06:44	Haute	54	87.8 \pm 88.2° (0.306, <0.01)	123.5 \pm 9.2°

Tableau 16 :Résumé des transects menés lors de la campagne d'août 2011 (Fossette et al. in prep) comprenant le numéro de transect, la date, l'heure de début des observations, le nombre de méduses observées, la direction de nage des méduses et la direction du courant.

Une fois les blooms localisés, l'étude se poursuit par voie marine pour observer les différentes directions/trajectoires des méduses. Les méduses sont, en général, à une profondeur maximum de 2 mètres. L'équipe de biologistes a équipé plusieurs individus sur place avec des GPS et des accéléromètres pour suivre leurs déplacements et mesurer leur effort de nage. En parallèle, des bouées ont été déployées pour mesurer le courant le long des trajets des méduses. Les transects au-dessus des agrégations ont été faits à marée descendante et montante afin d'observer la réponse des méduses aux changements de direction des courants. A chaque fois qu'une méduse est équipée, une bouée est déployée. Au départ la bouée et la méduse sont toujours à moins de 5m l'une de l'autre mais la bouée ensuite dérive. Le but étant une mesure du courant ressenti par la méduse, la bouée est redéployée dès qu'elle se situe à plus de 150-200m de la méduse (Fossette, communication personnelle). Le résultat est donc une série de vecteurs de différentes durées pour chaque bouée déployée.

2. Mesures des vitesses des méduses

Une fois sur place, les méduses sont équipées d'accéléromètres. Les accéléromètres sont de petits appareils électroniques directement fixés sur les méduses qui enregistrent leur comportement en 3D. Les données récoltées permettent de savoir comment la méduse nage ou se déplace : l'équipement mémorise chaque pulsation de la méduse, sa position dans la colonne d'eau et sa direction. Il s'agit d'un accéléromètre triaxial préposé à la saisie des données (G6a, CEFAS Technology Ltd, <http://www.cefastechnology.co.uk>, taille : 40*28*16 mm). Ces appareils ont été attachés à 18 méduses dont la taille varie entre 30 et 40 cm, ce qui représente un poids compris entre cinq et dix kilogrammes. Les appareils ont été installés afin d'enregistrer la vitesse des méduses dans les trois directions à une fréquence de 25 Hz avec une mesure de pression toutes les secondes. Ces mesures ont été couplées aux valeurs des bouées dérivantes, la Figure 57 rassemble les vitesses et directions de nage des méduses ainsi que les courants observés au même moment.

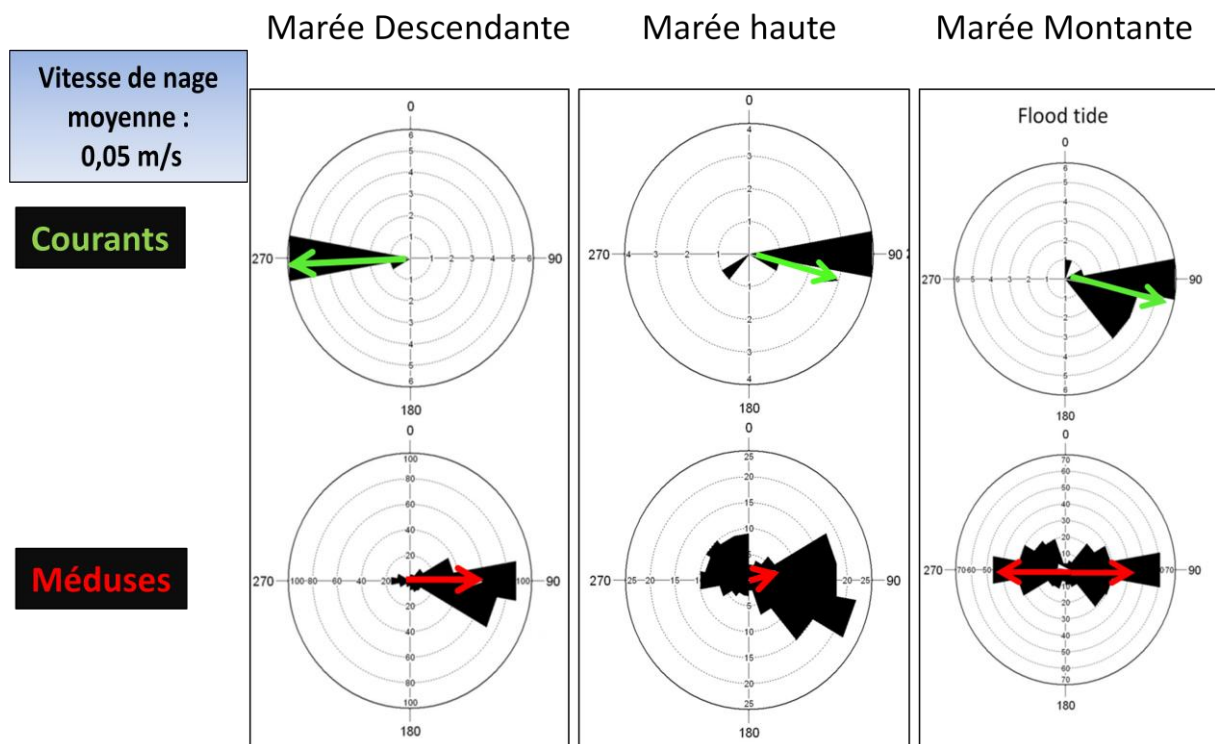


Figure 57: Histogrammes circulaires avec en haut les directions des courants et-en bas les directions de nage de méduses *Rhizostoma pulmo* mesurées le long de 19 transects et effectués entre le 21 Août et 1er Septembre 2011.

Marée descendante, $n = 7$ transects, 10 bouées et 298 méduses, marée basse, $n = 4$ transects, 6 bouées et 158 méduses, et marée haute, $n = 8$ transects, 16 bouées et 388 méduses, dans le Pertuis Breton. Dans chaque figure, la direction moyenne est représentée par une flèche, dont la longueur correspond à l'intensité (Fossette et al. in prep)

Les mesures montrent une corrélation entre les déplacements des méduses et les courants observés. A marée descendante, les méduses nagent à contre courant. Lors de l'étale de la marée basse et haute, on n'observe aucune direction de nage dominante pour les méduses.

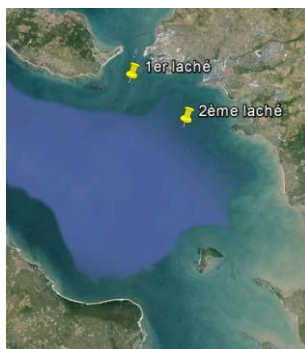
3. Mesures Bouées dérivantes

La calibration du modèle tidal a été détaillée dans le chapitre précédent. En plus des données marégraphiques, satellitaires et de courants qui ont été utilisées, le modèle de particules a été validé à l'aide de bouées dérivantes. Les données récoltées par les bouées et les capteurs GPS nous permettent de suivre le déplacement de méduses. Elles donnent une bonne représentation des directions et des vitesses des méduses dans le Pertuis. Cependant, ces données présentent seulement une durée d'enregistrement variant de 10 et 40 minutes. Afin de calibrer le modèle numérique de marée aux simulations de méduses de manière efficace, il est nécessaire d'avoir des données de bouées dérivantes sur un cycle de marée de 24h. Pour répondre à ces problèmes, douze bouées dérivantes ont été déployées, ce qui permet donc de compléter les données des biologistes et satisfaire de manière plus pertinente la calibration du modèle

Les bouées dérivantes utilisées dans cette thèse proviennent de la société Pacific Gyre (Figure 58, <http://www.pacificgyre.com/>). Ces bouées sont adaptées aux eaux côtières, elles se comportent comme des flotteurs Lagrangiens guidés par le courant à une profondeur donnée, entre 1 et 5 mètres sous la surface de la mer grâce à leur voile. Les bouées sont équipées de capteurs GPS qui enregistrent la position toutes les 10 minutes. Six bouées ont été déployées dans le Pertuis Breton et d'Antioche pour une période de deux semaines, du 3 au 7 juin 2013 et du 1^{er} au 5 Juillet 2013. Le choix de ces semaines correspond à une météo clémente, avec de faibles vents et houles pour déployer les bouées, semblable aux conditions météorologiques constatées lors des expériences sur les méduses en août 2011 (Figure 59). Les bouées ont été lâchées en groupe de trois, chacune espacée d'une heure pour la première expérience, tandis qu'un lâcher en ligne avec une bouée tous les 800 milles marin a été choisi pour la deuxième.



Figure 58 : Bouée dérivante et sa voile avant immersion.



	1er lâcher	2ème lâcher
Dates	02/06 - 07/06	01/07 - 05/07
Localisation	Ile de Ré	Baie d'Aytré
Nombre bouées	6	6
Marée	Montante	Descendante
Vent moyen	10 m/s	4 m/s
Direction	Est	Ouest

Figure 59 : Positions initiales des lâchers de bouées et résumé des caractéristiques météorologique

Les bouées sont laissées libres de mouvements dans les Pertuis. Malgré un trafic de bateaux dense durant les mois de juin et juillet aux alentours de la Rochelle, les bouées n'ont pas été gênées lors de leur déplacement et correspondent bien aux mouvements des masses d'eau.

Stratégie de modélisation

1. Calcul des trajectoires des méduses

Le logiciel TELEMAC (v 6.0) calcule les trajectoires des flotteurs passifs. Pour imiter le comportement des méduses nous avons implémenté la vitesse de la nage des méduses directement dans les sous-routines du logiciel Telemac. L'algorithme du calcul des déplacements d'une méduse entre l'instant t et $t+1$ peut être exprimé de la façon suivante :

$$X_{f\ i+1} = X_{f\ i} + v_x * \Delta t \quad (38)$$

$$Y_{f\ i+1} = Y_{f\ i} + v_y * \Delta t \quad (39)$$

Où $X_{f\ i}$, $Y_{f\ i}$, $X_{f\ i+1}$ et $Y_{f\ i+1}$ sont les positions du flotteur à l'instant t et $t+1$, v_x et v_y sont les composantes de la vitesse de nage de la méduse.

La vitesse de nage est constante durant la simulation. Cependant, lorsque les courants de marées sont faibles, comme cela peut être le cas lors de l'été, les observations montrent que les méduses n'ont plus de direction de nage prédominante (Figure 57). Afin de recréer le comportement des méduses de la manière la plus réaliste possible, une vitesse de courant minimum où les méduses se comportent comme des flotteurs passifs a été implémentée. Sous un certain seuil de vitesses de courants locaux, propre à chaque particule, la vitesse natatoire implémentée au départ de la simulation est mise à zéro. Si au pas de temps suivant cette vitesse repasse au-dessus du seuil minimum, la vitesse de nage sera à nouveau ajoutée.

2. Conditions initiales : scenario de la mise en place des particules

Durée de simulation et lâché des flotteurs

L'aire où les particules ont été relâchées se situe au Sud de la côte vendéenne en accord avec les observations faites *in situ* des regroupements de méduses. Elle représente un rectangle d'une largeur de 4 kilomètres sur une longueur de 10 kilomètres (Figure 60).

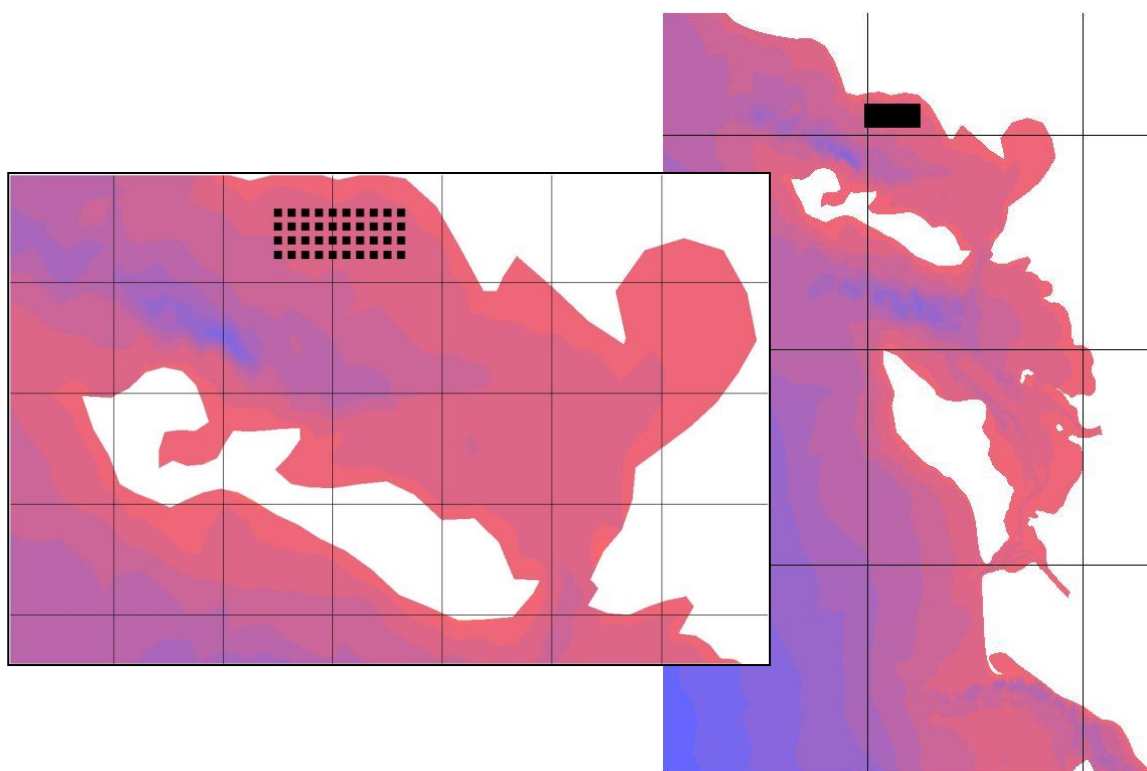


Figure 60 : Domaine du modèle et sa bathymétrie. Les points sur la gauche indiquent les positions du lâcher des particules dans le pertuis Breton au sud de la côte vendéenne

Les particules ont été lâchées durant 3 mois à partir du 27 août 2011. Ensuite, plusieurs stratégies de modélisation ont été appliquées. Dans un premier temps, il a été nécessaire de tester le modèle et sa réactivité quant au comportement de nage des particules. Ainsi, plusieurs vitesses et directions de nage ont été comparées à une simulation de particules passives dans les mêmes conditions. Dans un deuxième temps, plusieurs simulations ont été effectuées avec un lâcher de 100 000 particules dans le Pertuis Breton afin de déterminer l'impact statistique du nombre de particules lâchées. Enfin, les particules ont été relâchées de manière plus réaliste avec un lâcher de particules en différé sur le temps. Quarante particules (Figure 60) ont été libérées toutes les trois heures durant quinze jours, ce qui représente la période de marée et permet de couvrir un cycle de marée vives eaux-mortes eaux au complet.

À chaque expérience, les particules ont été suivies jusqu'à la fin de la simulation, soit 90 jours à partir du premier lâcher. Les particules lâchées au début de la deuxième expérience ont navigué plus longtemps que celles relâchées ensuite. Ceci représente une échelle de temps conforme à ce qui est connu du cycle de vie de la *Rhizostoma* qui n'est pas observé durant l'hiver dans les Pertuis Charentais (Husson and Fay, 1983). À la fin de chaque simulation de trois mois, 2 400 particules sont dans le domaine du modèle, soit le nombre estimé de méduses dans l'agrégation où les observations ont été faites.

Vent

L'étape suivante consistait à reprendre la même méthode en examinant l'effet du vent. Six scénarios ont été retenus :

- Modèle 1 : sans vent, sans nage
- Modèle 2 : sans vent, avec nage
- Modèle 3 : vent moyen, sans nage
- Modèle 4 : vent moyen, avec nage
- Modèle 5 : vent fort, sans nage
- Modèle 6 : vent fort, avec nage

Pour les modèles 3 et 4, la vitesse moyenne et la direction dominante observée durant les trois mois de la simulation ont été calculées puis utilisées pendant toute la simulation. Nous avons agi de la même façon pour les modèles 5 et 6 mais avec les vitesses maximums observées. Après l'analyse des données météorologiques entre le 1 août 2011 et le 1 décembre 2011, nous obtenons les valeurs suivantes (Tableau 17):

Vent	vitesse (m/s)
moyenne	4,3
médiane	4,1
max	11,2

Tableau 17 : Moyenne, médiane et le maximum de l'amplitude de la Vitesse des vents observés sur trois mois

Ces données montrent que les vents de direction Ouest sont prédominants et représentent plus de 50% des vents observés durant cette période. Le vent le plus fort observé est de 11,2 m/s durant la période avec une moyenne à 4,3 m/s et une médiane à 4,1 m/s. Les valeurs de 4 m/s et 10 m/s pour un vent d'ouest moyen et maximum ont été retenues pour les simulations des modèles 3 à 6.

Calcul des densités de population

Pour chacun de ces modèles, les densités de populations ont ensuite été calculées. Les résultats ont été utilisés après un post-traitement par Matlab pour cartographier la densité des

particules dans les Pertuis Charentais et estimer leur dispersion. Pour chaque pas de temps, une carte avec des densités a été produite pour voir s'il y a une différence entre dérive et nage contre le courant. Cela nous permet de tester l'hypothèse suivante : nager contre le courant permet-il aux méduses de rester groupées ? Les résultats de la distribution des particules se présentent sous la forme d'une grille de un kilomètre par un kilomètre où le nombre de particules était calculé pour chaque cellule (Figure 61).

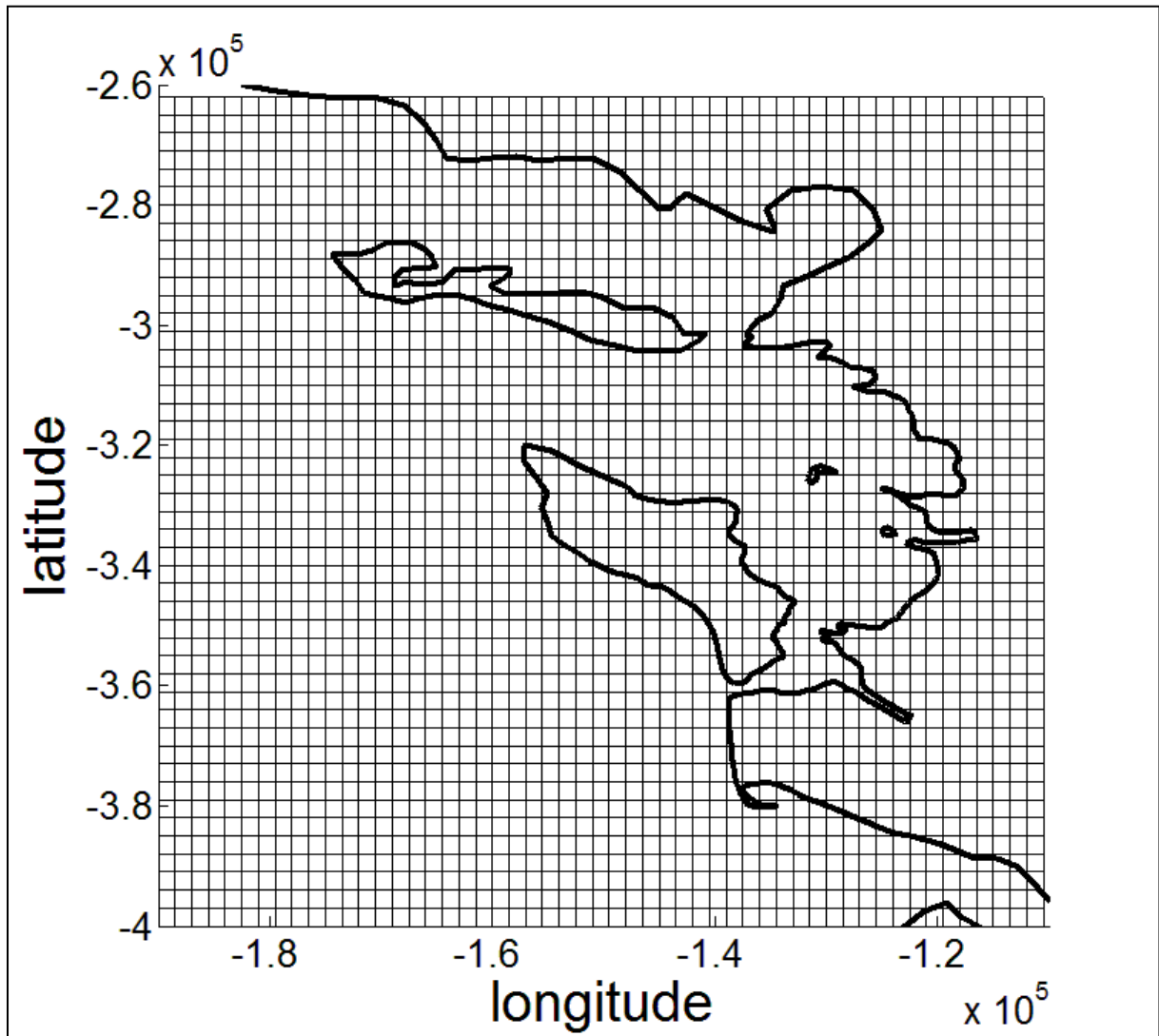


Figure 61 : Exemple d'une grille de résultats de densité nulle.

Echouage des flotteurs

Un dernier traitement des résultats nous permet d'éliminer les particules se trouvant dans une zone avec une hauteur d'eau minimum déterminée. Cette analyse aboutit à une simulation des échouages de méduses. Déterminer le nombre de méduses qui arrivent dans une zone à risque avec peu de fond est un point essentiel. Lorsque les méduses se trouvent en milieu peu profond, comme le bord d'une plage, elles ont peu de chances de repartir vers le

large et finissent par s'échouer. Si nager contre le courant ne permet pas aux méduses de rester groupées ou de rester dans la zone de départ, il est probable que ce comportement leur permette de diminuer le nombre d'échouages.

Il faut premièrement, compter combien de méduses au cours de la simulation arrivent dans ces zones à risques et deuxièmement renouveler la manipulation pour tous les pas de temps de calcul. Ensuite, il est nécessaire de « tuer » les méduses pour être sûr de ne pas compter plusieurs fois la même méduse. Il a été décidé que les particules arrivant dans une zone où il y a moins d'un mètre d'eau sous leur position seraient éliminées. De ce que l'on sait, les méduses peuvent s'échouer lorsqu'elles sont vivantes et mourir une fois sur la plage (Hays et al., 2012). En revanche une espèce de méduse *Aurelia labiata*, qui est beaucoup plus petite que *Rhizostoma*, change de comportement quand elle est dans moins de 1 m d'eau et nage près de la surface pour être emportée vers le large par le courant (Albert, 2011). On peut affirmer que le fait d'être dans moins de 1 m d'eau augmente le risque d'échouage, en particulier pour la *Rhizostoma* dont la taille est conséquente couplé à la houle et les zones de déferlement abondantes observées dans les Pertuis Charentais. Dans la réalité l'échouage n'est pas automatique mais dans le modèle, l'hypothèse est qu'une méduse s'échoue quand elle est dans moins de 1 m d'eau, comme illustré dans la Figure 62.

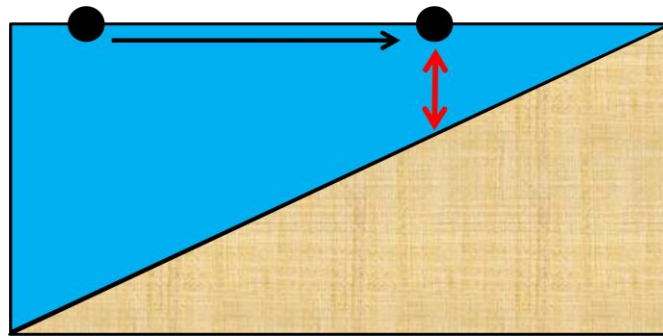


Figure 62 : Représentation schématique d'un flotteur arrivant près des côtes pour s'échouer. Avec en rouge la hauteur d'eau minimale de 1mètre considérant le flotteur comme échouer dans le modèle.

Résultats du modèle

1. Bouées dérivantes

Les mesures *in situ* de suivi de méduses avec les bouées dérivantes ont été comparées au modèle (Figure 63). Les valeurs d'enregistrement étant particulièrement courtes, inférieures à 10 minutes pour la plupart, nous avons pris deux trajectoires assez longues, proche d'une heure, avec deux marées différentes, l'une montante et l'autre descendante. Les deux flotteurs ont été lâchés à cette même période.

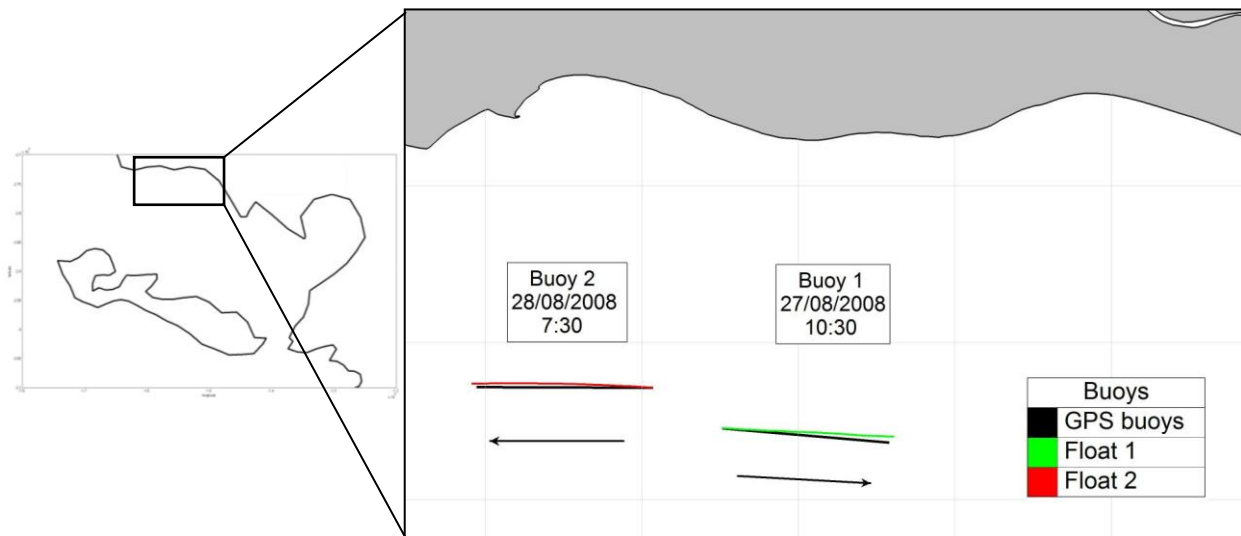


Figure 63 : Trajectoire des bouées dérivantes et trajectoires des flotteurs modélisés pour la même période de temps.

La différence entre les flotteurs numériques et les vraies bouées est négligeable.

2. Influence du nombre de flotteurs

Le nombre de particules de 1000 à 120 000 a été testé dans une zone de largage commune définie afin de déterminer l'impact du nombre de particules lâchées. Les tests ont été faits sur une durée de 30 jours avec 1000 et 120 000 flotteurs. Comme il est montré sur la figure suivante, avec une durée de simulation identique, l'augmentation du nombre de flotteurs n'est pas significative sur la dispersion en pourcentage.

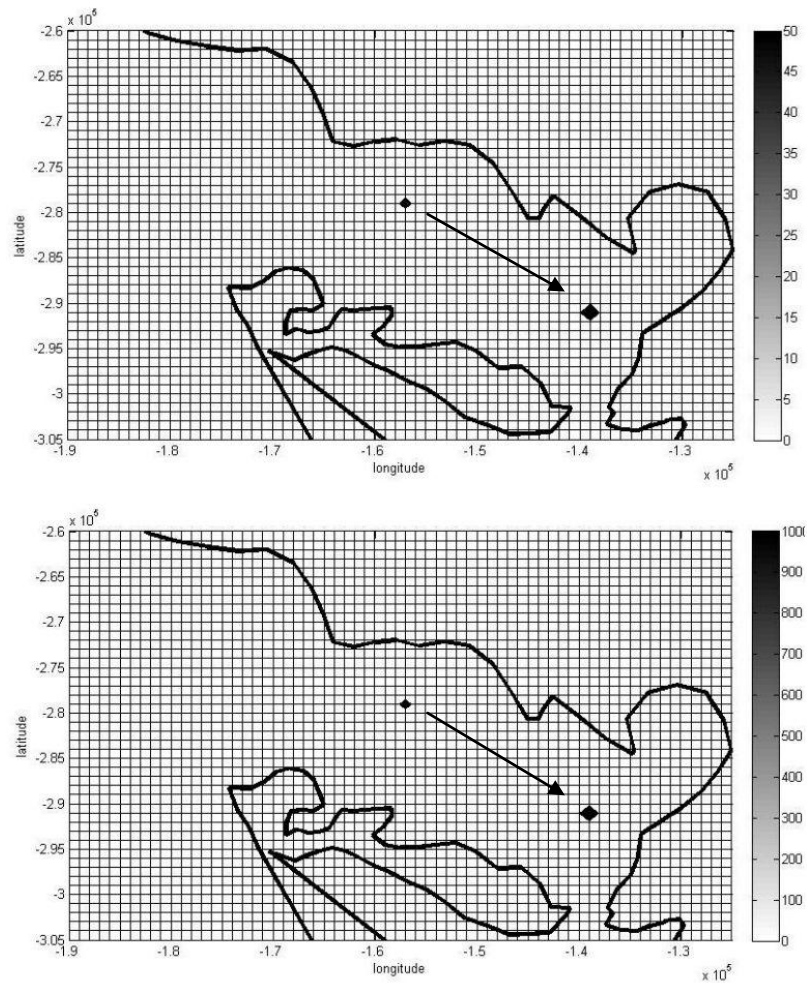


Figure 64 : Au-dessus : La distribution spatiale de 1000 particules après 1 mois de simulation,
Dessous : La distribution spatiale de 120 000 particules après 1 mois de simulation

Les pics de densité sont présents exactement aux mêmes emplacements pour les deux simulations. Augmenter la densité de particules dans la zone de départ ne permet pas de définir avec plus de précision le déplacement de particules. Il y aura effectivement plus de particules dans un seul et même endroit, mais ceci n'est pas représentatif lorsque l'étude se penche sur la densité. Le nombre de flotteurs choisi est donc suffisant.

3. Distribution des particules du modèle

Le total de particules lâchées pour chaque cas est de 2400. Les densités sont présentées en fonction du nombre de particules par cellule : zéro pour aucune particule, puis de 1 à 20, de 20 à 100, de 100 à 250 et enfin supérieur à 250. Pour les simulations de particules relâchées au Sud de la côte vendéenne en août, les résultats sont d'abord présentés sans comportement de nage puis avec comportement de nage, suivant les scénarii de vent exposés précédemment. Les figures suivantes illustrent la distribution des particules en densité tous les 14 jours, ainsi que le nombre de particules échouées et cumulées depuis le début de la simulation.

Comportement passif

Sans vent (Figure 65): Les particules restent bien ensemble dans les premiers jours puis elles se divisent en trois parties qui resteront entières sur la simulation. La première quitte le Pertuis Breton par le Nord, tandis que la deuxième reste au milieu et que la dernière se situe à l'embouchure de l'anse de l'Aiguillon. Cette configuration restera constante sur la durée de la simulation. La partie au nord, plus faible au niveau des densités, s'expulse le long de la simulation. L'agrégation située au-dessus de la Fosse de Chevarache du Pertuis Breton reste localisée au même endroit mais s'amenuise au fil du temps, avec des pics de particules au dessus de 250 qui ne seront plus présents au bout de 84 jours. La dernière partie devant la baie de l'Aiguillon forme un bloc compact au bout de 28 jours qui semble éclater au fur et à mesure avec des pertes de particules entre le Pertuis Breton et le Pertuis d'Antioche. En revanche, ce rassemblement ne perd pas en densité tout au long de la simulation, avec toujours des pics constants au-dessus de 250 particules.

Le nombre d'échouages reste minime en début de simulation ; seulement 3 particules échouent au bout de 14 jours. La cadence s'accélère après 56 jours avec 462 particules échouées. Ce nombre double 14 jours plus tard avec 891 particules échouées pour terminer avec 1170 particules échouées en fin de simulation. Ceci représente quasiment 50% des particules.

Vent Ouest moyen (Figure 66): La configuration précédente se profile lors des 28 premiers jours, avec trois agrégations distinctes. Contrairement à la simulation sans vent, les particules au nord du Pertuis s'échappent beaucoup plus rapidement et disparaissent après 42 jours. Le rassemblement du milieu du Pertuis Breton s'amenuise au fur et à mesure des jours avec une forte densité qui faiblit. Toutefois, la localisation reste inchangée. La dernière agrégation éclate au bout de 42 jours. On remarque que la densité est cette fois-ci très supérieure à la densité observée sans vent en début de simulation. Contrairement au cas précédent, les particules quittent très tôt le Pertuis pour atteindre le Pertuis d'Antioche. Au jour 70, un groupe est localisé à l'extrémité sud de l'île de Ré, tandis qu'un second groupe se forme au nord-ouest de l'île d'Aix. Au dernier pas de temps, une partie des particules est éjectée par le Pertuis de Maumusson après avoir traversé la Baie de Marennes-Oléron. Une deuxième partie, avec des pics de densité plus importante, prend place sur les rivages de la Rochelle, de l'extrémité sud de l'île de Ré et de la baie d'Angoulin.

Le nombre d'échouages est moins important durant la simulation mais augmente très vite lors du dernier mois de simulation. En tout, 1042 échouages ont été calculés, ce qui représente 43,5 % du total des particules lâchées. Malgré un nombre d'échouages un peu plus faible que les résultats sans vent, on remarque qu'aucune région n'a une densité de particules supérieure à 250.

Vent ouest Fort (Figure 67) : Dès le début de la simulation, toutes les particules sont poussées au bout du Pertuis Breton en un groupe homogène. Les particules se suivent et s'évacuent dans l'océan Atlantique en prenant deux directions différentes après avoir passé le courrou de la Pallice. Une partie remonte le Pertuis d'Antioche avant de se déverser dans les

eaux océaniques, tandis qu'une autre partie s'évacue en passant par la Baie de Marennes-Oléron. Aucun pic de densité supérieur aux autres n'est à observer durant la simulation, hormis une masse qui se forme autour de la Baie d'Angoulin au jour 28.

Le nombre d'échouages augmente drastiquement dès que les particules rejoignent le Pertuis d'Antioche et la Baie de Marennes-Oléron au jour 42. Leur nombre passe de 173 à 951. À la fin de la simulation, on recense 1381 échouages, ce qui représente 58% des particules.

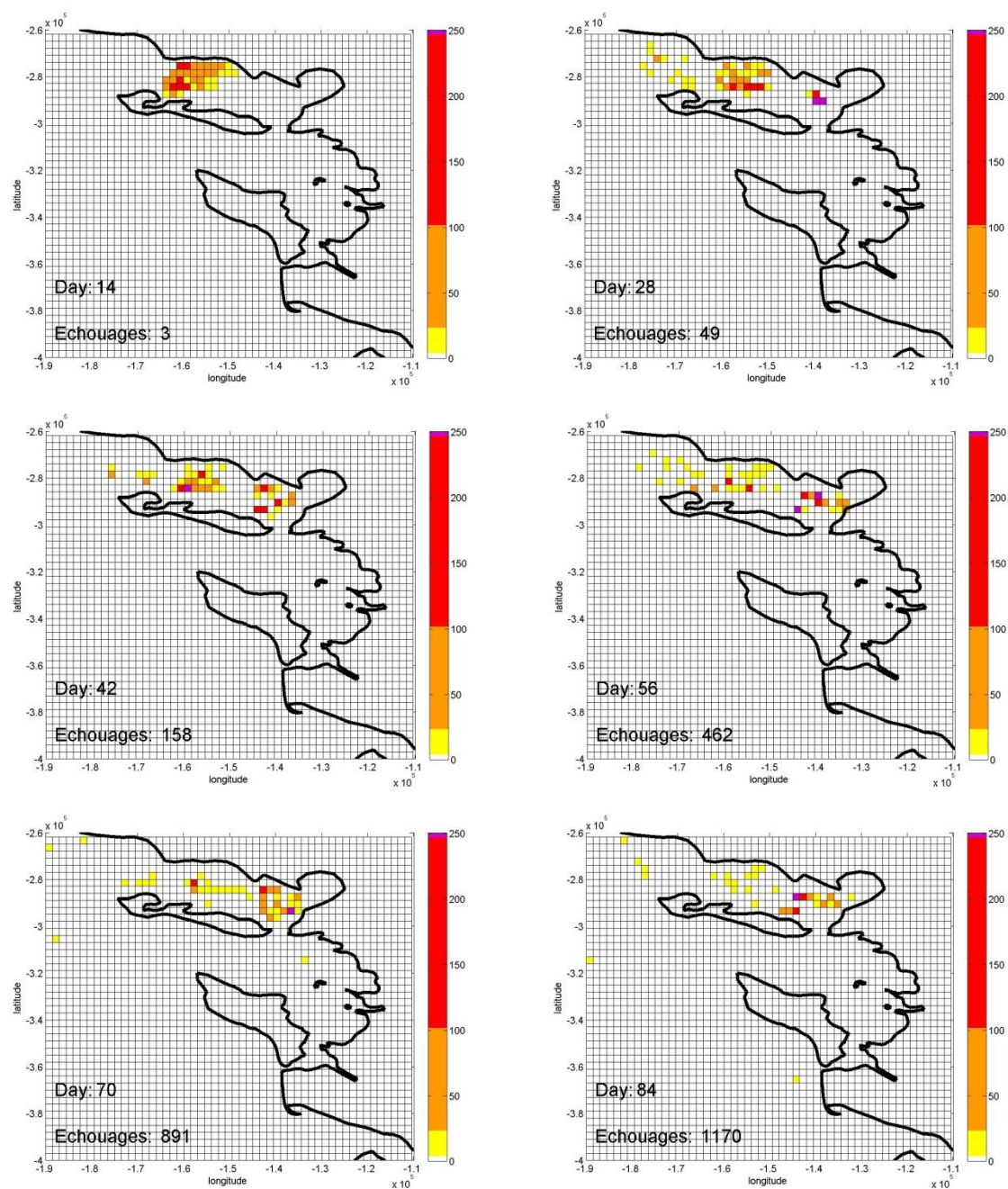


Figure 65 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton sans vent et sans nage (modèle 1). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km

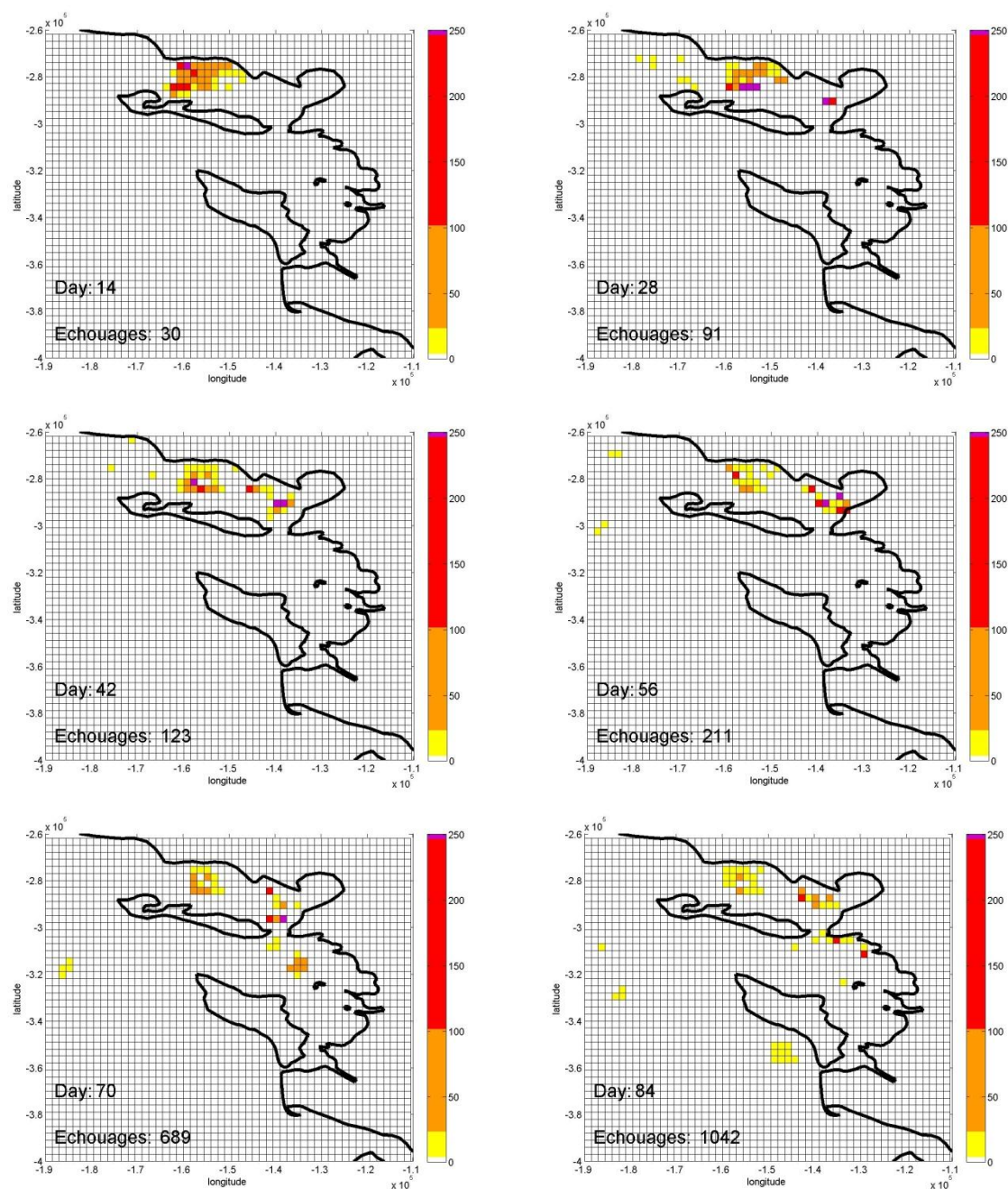


Figure 66 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 4m/s et sans nage (modèle 3). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km

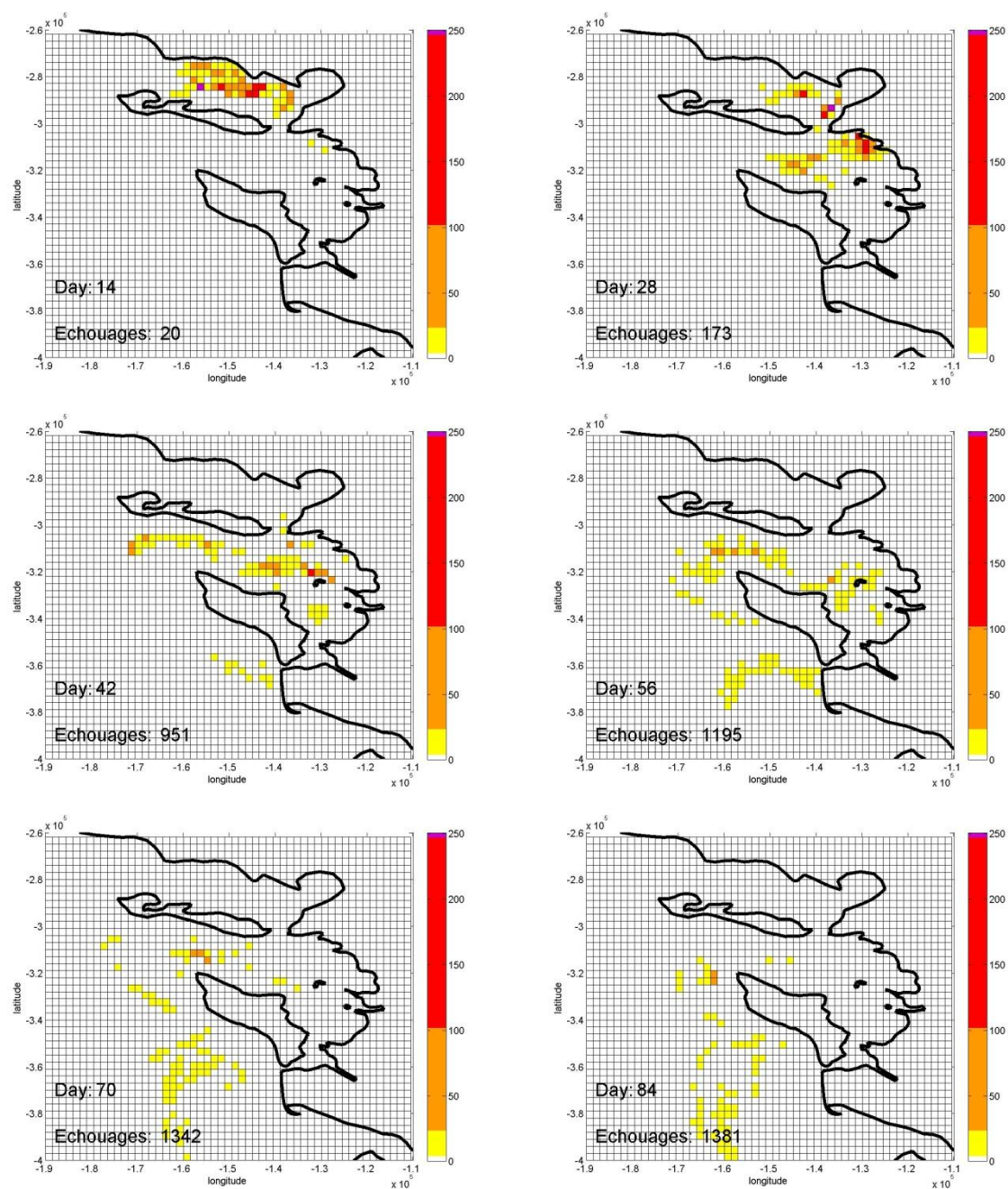


Figure 67 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis breton avec un vent Ouest de 10 m/s et sans nage (modèle 5). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km.

Avec comportement de nage

Sans vent (Figure 68) : Les particules s'étalent le long du Pertuis Breton, de l'Aiguillon jusqu'au nord de l'île de Ré, pendant 84 jours. De fortes densités apparaissent aux jours 28 et 42 au sud de la côte vendéenne, ainsi qu'à l'embouchure de l'anse de l'Aiguillon, cette fois-ci tous les jours. Les particules ne s'échappent pas par le courrou de la Pallice mais presque uniquement par la partie nord du Pertuis Breton pour ensuite longer la côte vendéenne. En fin de simulation, les pics de densité se trouvent au milieu de la fosse et à l'embouchure de l'Aiguillon. Deux pics de densité localisés se détachent. Un pic se démarque en haut de la partie sud de l'île d'Aix à partir du jour 42. Le faible pourcentage de particules qui arrivent à s'échapper par le courrou de la Pallice au jour 70 se loge en bas de l'extrémité sud de l'île de Ré.

Le nombre de particules échouées est nul jusqu'au 42ème jour avec 63 échouages. Ce nombre évolue peu jusqu'à la fin de la simulation avec 77 échouages, soit 3,2%.

Vent Ouest moyen (Figure 69) : Les particules restent rassemblées durant les 28 premiers jours avec deux pics de densité qui se forment au sud de la Vendée et au sud de l'Aiguillon. Ensuite, le pack se disloque avec des pertes au nord du Pertuis Breton aux jours 42 et 58. La majeure partie de la masse reste rassemblée jusqu'à la fin de la simulation. Trois pics se dégagent sur la dernière image : au sud de la Vendée, au sud de l'Aiguillon et à la partie haute de l'extrémité sud de l'île de Ré. On constate au 70ème jour qu'un rassemblement important de particules quitte le Pertuis Breton et finit par se loger dans la Baie d'Angoulin au jour 84.

Le nombre d'échouages est faible, avec moins de 3% de particules échouées à la fin de la simulation.

Vent ouest Fort (Figure 70) : En début de simulation, au jour 14, l'ensemble des particules est accolé à la côte vendéenne. Elles quittent ensuite très rapidement le Pertuis Breton, au jour 28, pour atteindre le Pertuis d'Antioche. Comme pour la simulation sans nage, les particules se divisent en deux groupes, l'un remontant le Pertuis d'Antioche et l'autre passant par la Baie de Marennes-Oléron. Le nombre de particules passant par la baie est moins important avec le comportement de nage.

Le nombre de particules échouées est très grand dès le début de la simulation. Au jour 28, on dénombre 1486 particules, soit 62%. Ce chiffre continue d'augmenter jusqu'au dernier jour de simulation pour atteindre 73% de particules échouées.

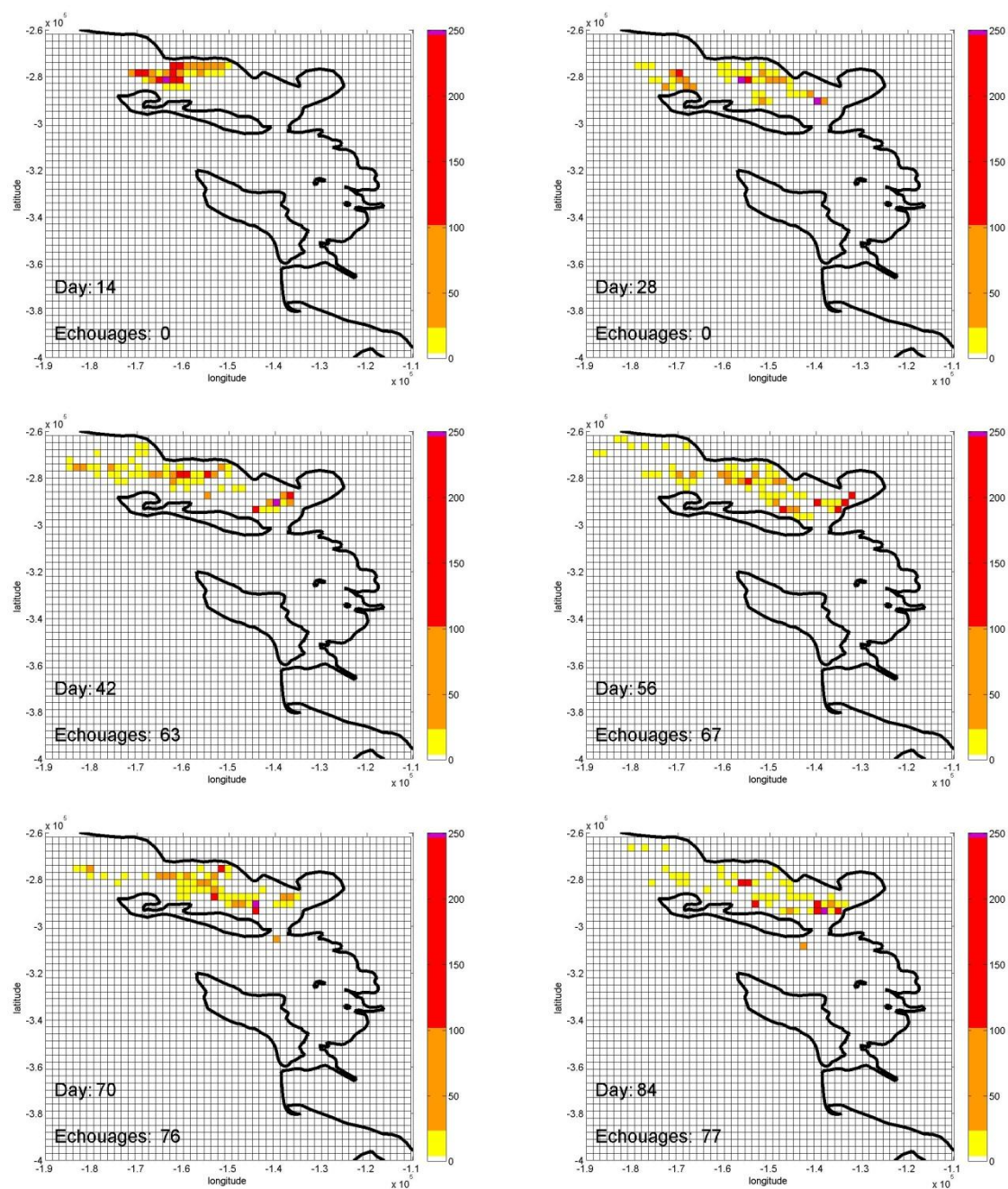


Figure 68 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton sans vent et avec nage (modèle 2). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km

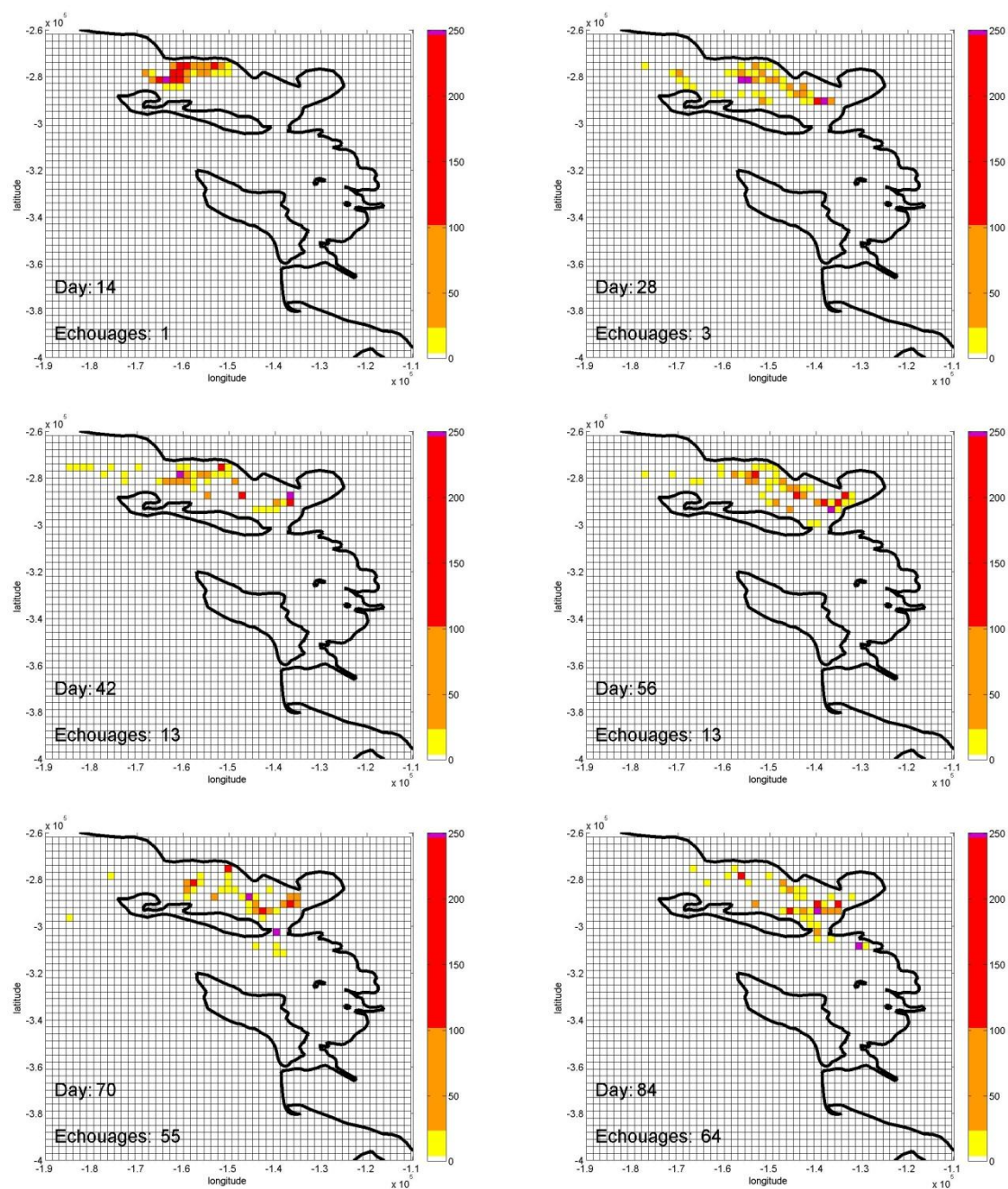


Figure 69 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 4m/set et avec nage (modèle 4). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km

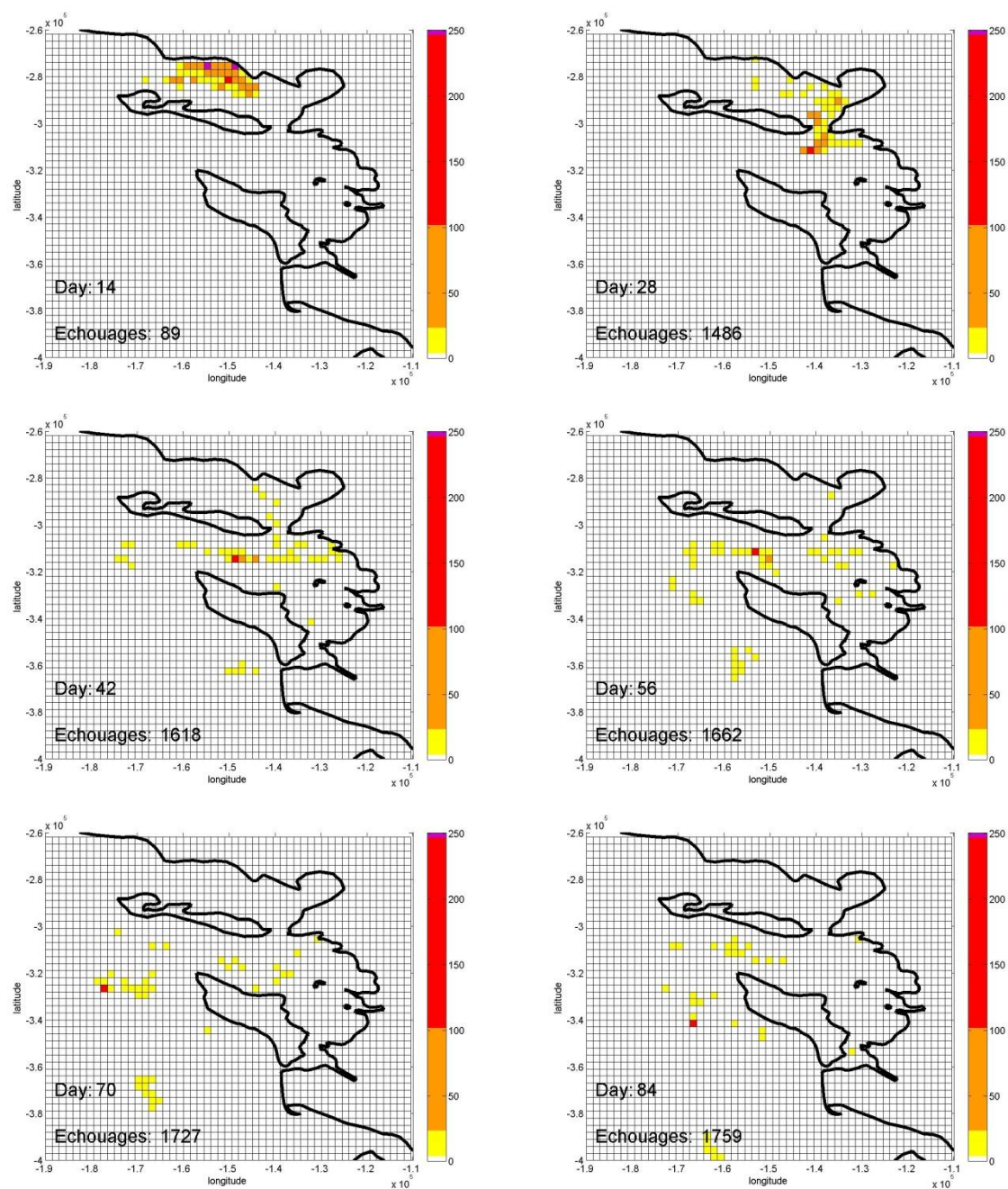


Figure 70 : Distribution horizontale des particules relâchées dans le Pertuis Breton avec un vent Ouest de 10m/s et avec nage (modèle 6). Les particules sont comptées tous les 14 jours sur une grille de 1 km* 1 km

4. Comparaison de la distribution des *Rhizostoma pulmo* et du modèle de particules

La figure suivante (Fossette et al., In prep) illustre la distribution de la *Rhizostoma octopus* pendant les observations de 1983 et durant la campagne de mesure en août 2011. Les méduses ont été observées en abondance dans le Pertuis d'Antioche et en particulier sur la côte Est. Trois blooms majeurs entre La Rochelle et Chatelaillon sont représentés. Un plus petit bloom se trouve au sud de la pointe de l'île de Ré, face à Rivedoux. La dernière agglomération de méduses se trouve en face d'Arc en Ré. Dans le Nord du Pertuis Breton, trois autres blooms importants y sont localisés. On retrouve aussi de plus petites agglomérations de méduses à la pointe de l'Aiguillon et au niveau de la fosse du Pertuis Breton. Trois observations plus mineures de méduses sont notées le long de la côte nord de l'île de Ré : au niveau de la Flotte, vers les portes en Ré et à l'entrée du Pertuis Breton. Les observations de 2011, qui se limitent à l'intérieur des Pertuis, se rejoignent avec la campagne de mesures faite en 1983 sur les zones communes de proliférations de méduses. On ne retrouve pas de zones communes avec les observations faites le long de la côte oléronaise, côté océan.

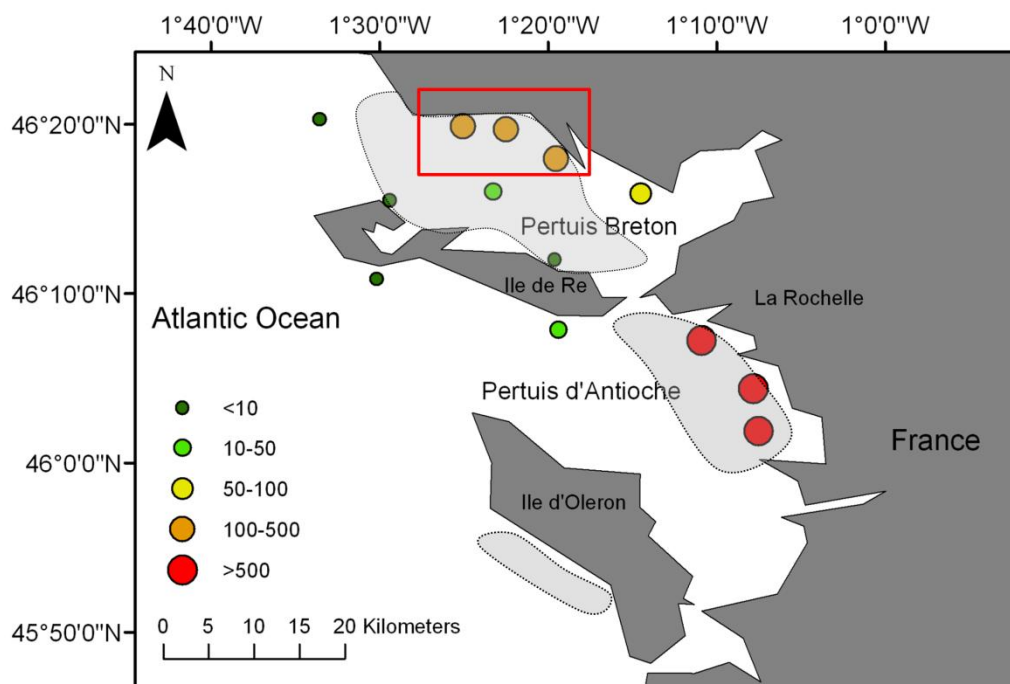


Figure 71 : Distribution spatiale et abondance des méduses *Rhizostoma pulmo* dans les Pertuis Charentais, estimées lors d'un survol aérien le 22 août 2012. Les zones grisées représentent les agrégations de méduses observées entre avril et septembre 1983(data modifiée de Husson & Fay 1983)

Les simulations recoupent les observations dans certaines situations. Les particules simulées avec et sans mouvement de nage montrent de faibles densités dans le Pertuis d'Antioche, à l'exception des simulations avec vent. Sans vent, la simulation avec comportement de nage reproduit mieux les blooms situés au sud de la Vendée, avec une

densité plus importante que sans nage. Le bloom situé à la pointe de l'Aiguillon est plus proche de la position observée avec nage que sans nage, au jour 42 par exemple. Les deux cas montrent des pics de densité au niveau d'Arc en Ré avec une densité plus forte sans mouvement. Avec les simulations de vent moyen, les particules quittent la zone du Pertuis Breton et atteignent le Pertuis d'Antioche. On remarque que le modèle reprend avec fidélité le petit bloom de méduses en face de Rivedoux pour chaque simulation. Les méduses qui quittent le Pertuis Breton ont tendance à venir se coller dans la Baie d'Angoulin, qui est au sud de La Rochelle, et ce au jour 84 avec et sans mouvement de nage. On peut aussi noter dans les simulations que les particules quittant la Baie de Marennes-Oléron par le Pertuis de Maumusson longent la côte oléronaise au jour 84 avec un vent moyen.

Les résultats de densités, avec et sans comportements de nage, retrouvent de façon satisfaisante les positions des blooms observés, notamment avec les trois gros blooms du Pertuis d'Antioche et face à Rivedoux. En revanche, le modèle avec nage reproduit avec plus de fidélité les localisations des blooms du Pertuis Breton, en particulier ceux situés au sud de la Vendée. Les deux cas reprennent le panache de méduses le long de la côte oléronaise avec satisfaction.

5. Echouages des particules du modèle

La partie précédente montrait les distributions spatiales des méduses avec le nombre d'échouages calculé après un certain nombre de jours de simulation. Nous détaillerons ici ces résultats pour les différents cas de vent et les relations entre les échouages et la marée correspondante. Les résultats sont présentés sur les figures suivantes (Figure 72-Figure 74):

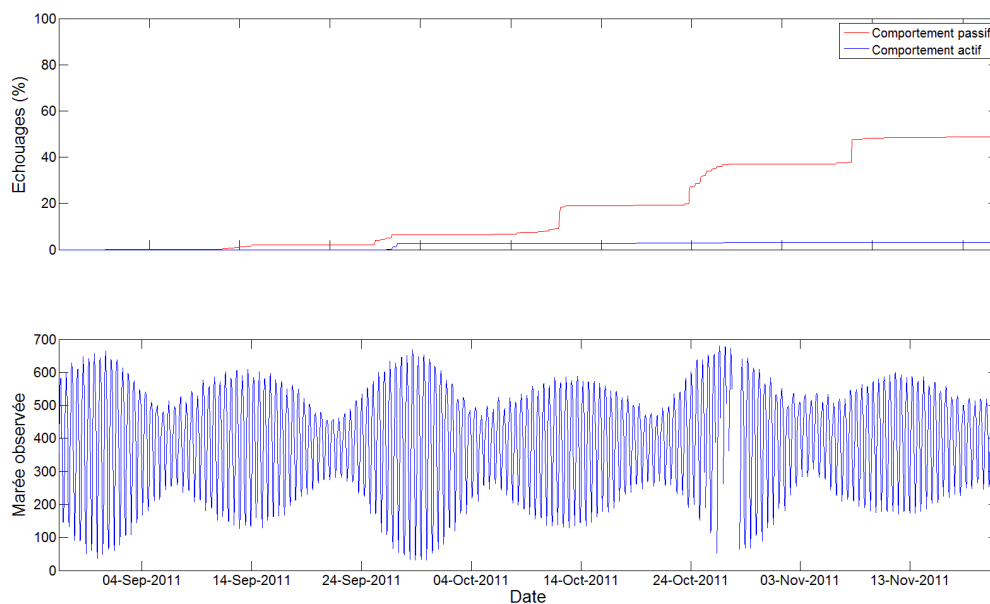


Figure 72 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, sans vent, avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice

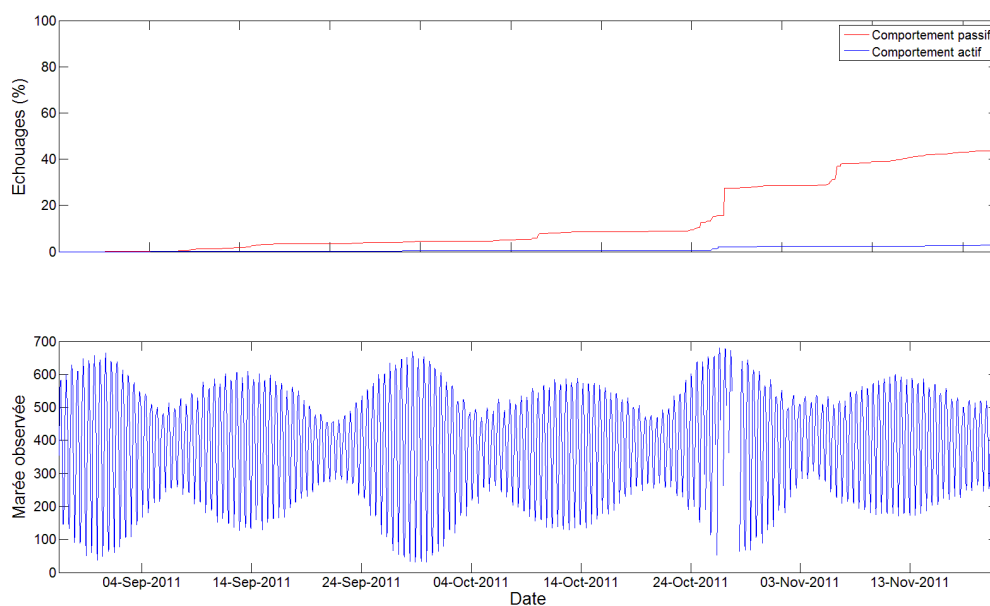


Figure 73 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, avec un vent de 4 m.s^{-1} , avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice

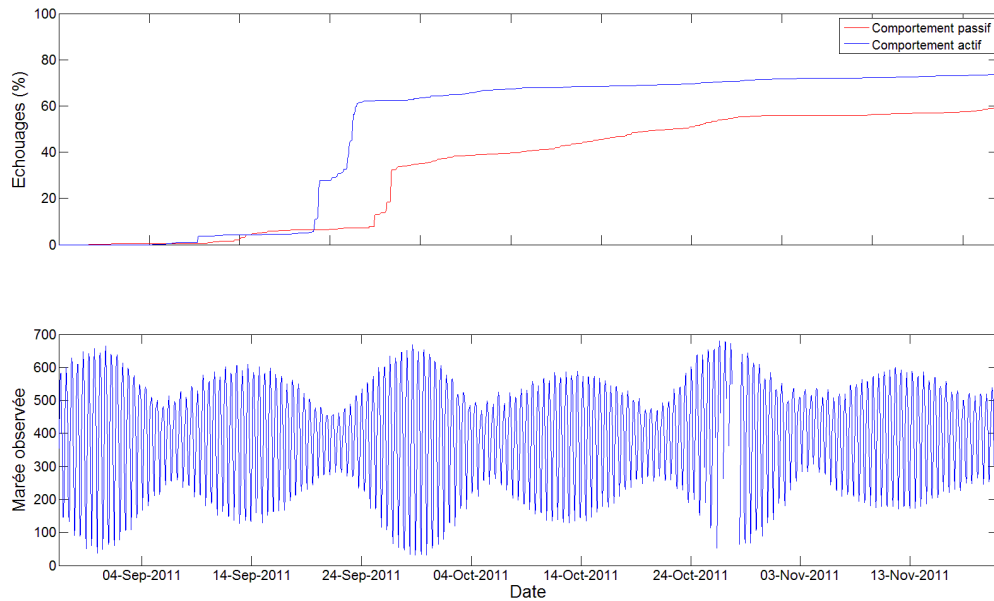


Figure 74 : Pourcentage des échouages des particules en fonction du temps, avec un vent de 10 m.s^{-1} , avec et sans comportement de nage. Marée observée à la Pallice

Vent nul (Figure 72): Avec un comportement de nage, les particules ne s'échouent quasiment pas durant la simulation, avec un maximum de 3,2% atteint le dernier jour. Le nombre de particules échouées sans comportement s'accroît de façon cyclique, avec une courbe en « marches d'escalier » qui augmente à chaque fin de la période de revif. Les échouages se stabilisent ensuite, lors du déchet, et n'augmentent que très peu à cette période. Durant les deux périodes de revif du mois d'octobre, on remarque que le palier augmente de manière significative lorsque le coefficient de marée est plus important avec 111 pour le 27 octobre, alors qu'au 12 octobre le coefficient est de seulement 84. Malgré une courbe très linéaire pour le cas avec comportement de nage, un léger décrochement se forme lors de la période de revif de fin septembre. Sur l'ensemble de la simulation, le nombre de particules échouées avec comportement actif est toujours inférieur à celui au comportement passif.

Vent moyen (Figure 73): Pour les deux cas, les pourcentages d'échouages de particules se dessinent de la même manière que le cas sans vent. Le nombre de particules échouées avec comportement passif est linéaire et reste très faible tandis que le nombre de celles sans comportement augmente en palier à chaque fin de période de revif. Ici encore un sursaut est à noter lors de la période de revif du 27 octobre. Le pourcentage de particules échouées sans comportement de nage augmente lui aussi durant la même période.

Vent fort (Figure 74): Les simulations avec un vent de 10 m.s^{-1} montrent une faible différence avec deux courbes à la forme similaire. Elles augmentent jusqu'à la semaine du 17 septembre où le taux d'échouages s'accroît très vite, passant de 3,7% à 65 % pour les particules actives et de 7,2% à 40% pour celles qui sont passives, le tout en seulement 5 jours. Ces pourcentages augmentent graduellement jusqu'à la fin de la simulation. La vitesse de nage des particules n'a aucun impact sur les résultats avec un fort taux d'échouages dans les deux cas présentés. On atteint ici la limite de résistance aux courants de surface générés par le vent auquel les particules peuvent lutter.

6. *Indice de dispersion*

Afin de montrer de manière quantitative que les particules avec mouvements ne sont pas moins dispersées que les particules passives, nous avons calculé un index de dispersion basé sur le nombre moyen de particules par cellule et sur la variance. Walker (2011) propose une méthode simple où l'indice de dispersion est le rapport entre la variance sur la moyenne du nombre de particules par cellule. Nous avons appliqué cette méthode et calculé ce rapport à chaque pas de temps afin d'avoir l'index de dispersion au cours du temps pour les deux modèles avec et sans mouvements. Le calcul de l'indice de dispersion se fait de la manière suivante :

$$R = \frac{\text{Variance}}{\text{Nombre de flotteurs/Nombre de cellules}} \quad (40)$$

Ce rapport, R, est donc la variance des flotteurs sur le nombre total de flotteurs divisé par le nombre de cellules. Les cellules qui sont localisées sur des parties terrestres ont été retirées du calcul, ce nombre reste inchangé pour chaque pas de temps. Les résultats de l'indice de dispersion sont utilisés pour déterminer si l'échantillonnage est uniforme ou groupé. Un indice faible indique une distribution uniforme, au contraire lorsque l'indice est élevé nous sommes dans le cas d'une distribution groupée. Les courbes de l'indice de dispersion au cours du temps sont présentées (Figure 75-Figure 77):

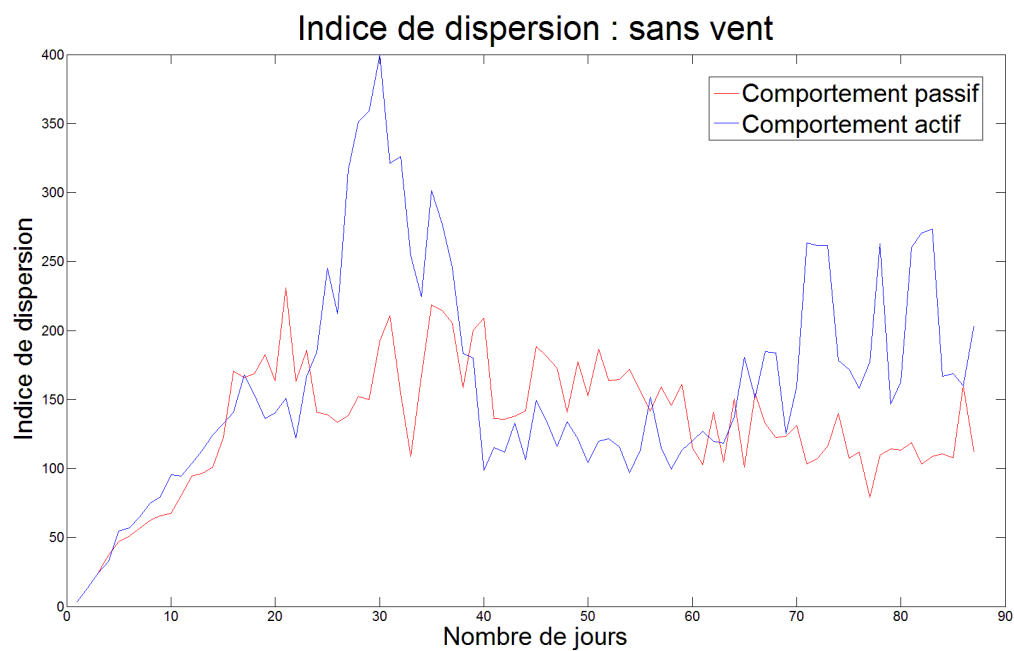


Figure 75 : Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations sans vent.

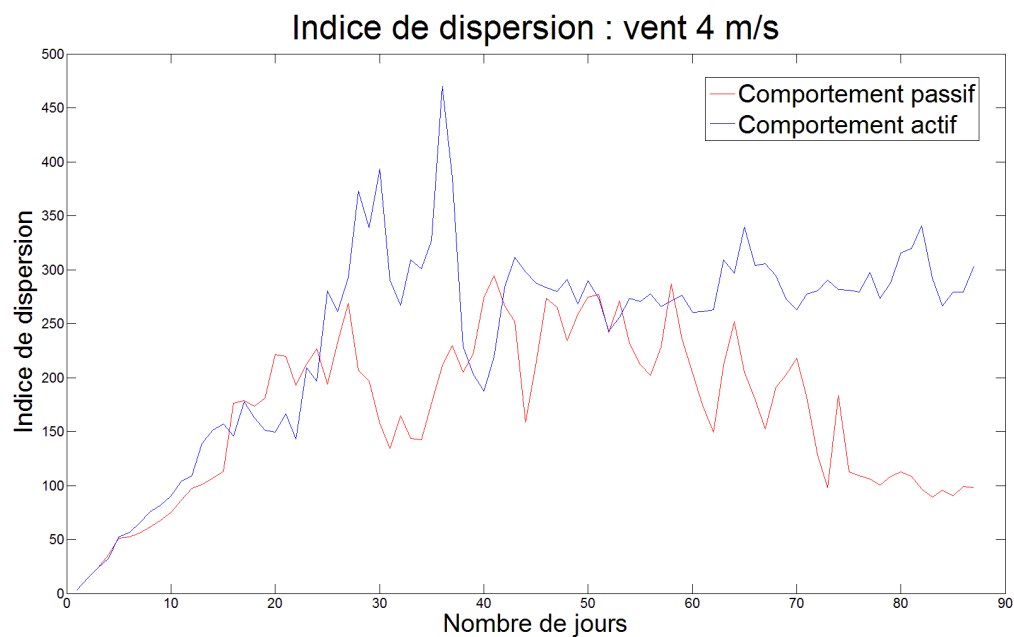


Figure 76: Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations avec vent moyen.

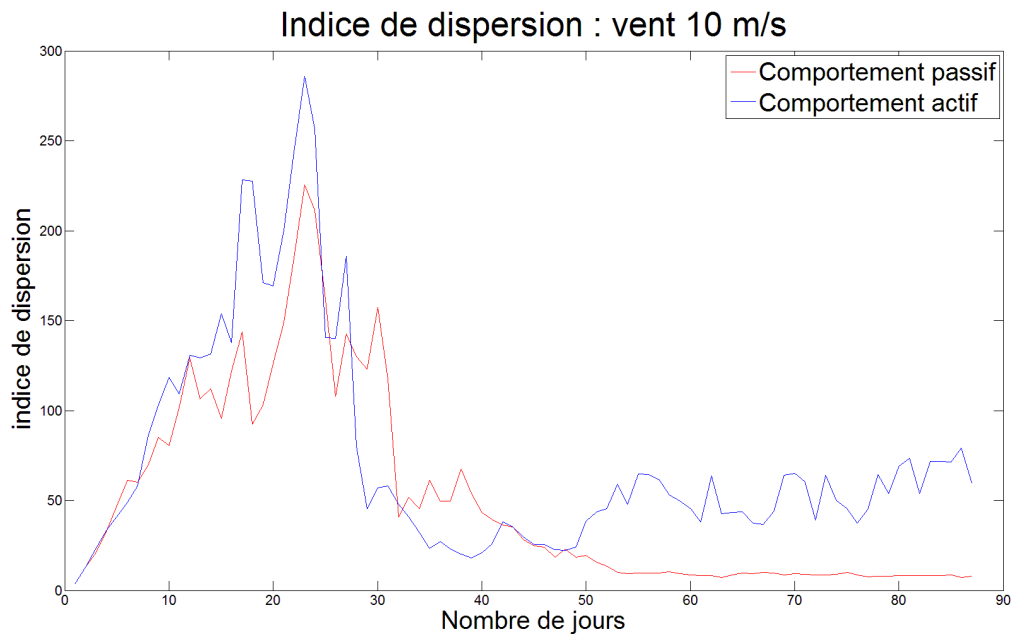


Figure 77: Indice de dispersion calculé au court du temps avec et sans comportement de nage, pour des simulations avec vent fort.

Il est important de noter que la valeur de R est élevée pour chaque simulation car nous sommes dans un cas où il y a peu de particules comparées au nombre de cellules. Comme l'analyse est quantitative ceci ne pose pas de problèmes pour l'analyse des résultats.

Pour l'ensemble des simulations, les résultats montrent un indice de dispersion qui s'élève linéairement au début de simulation, pendant les 15 premiers jours. Puis, la valeur de R continue de monter lorsque les flotteurs sont regroupés au point de départ pour enfin diminuer lorsque les flotteurs se dispersent. Il remonte à chaque fois qu'une agrégation se forme. Les résultats présentent des divergences selon les cas de vent mais le ratio des simulations avec comportement de nage est supérieur dans la plupart des cas à celui sans comportement :

Vent nul (Figure 75) : le ratio, avec comportement actif, continue de monter après le 20ème jour de simulation jusqu'à être deux fois plus important au 30ème jour que le ratio sans comportement. Vers la fin de la simulation trois pics se forment pour atteindre 250.

Vent moyen (Figure 76) : Avec comportement, le ratio monte jusqu'au jour 30 puis se stabilise à une valeur de 300 tandis que la courbe de résultats sans comportement diminue graduellement jusqu'à 100 à la fin des simulations.

Vent fort (Figure 77) : Les deux courbes du ratio proposent un schéma commun, avec un pic très important à 25 jours qui s'effondre ensuite. Les résultats sans comportement se rapprochent de zéro tandis que ceux avec comportement se stabilisent à une valeur proche de 60.

Les résultats de l'indice de dispersion indiquent que les méduses avec comportement semblent être moins dispersées et donc plus agrégées que sans comportement

Discussion

Les simulations numériques d'agrégations de méduses, aussi connues sous le nom de blooms, ont émergé depuis quelques années (Johnson et al. 2001, 2005; Barz et al. 2006; J.-H. Moon et al. 2010; Berline et al. 2013). En termes d'hydrodynamique, les études précédentes ont considéré les méduses comme des traceurs passifs en attribuant la formation des blooms aux particularités régionales des courants marins. Notre étude met en avant le rôle de la nage propre des méduses dans la formation des blooms et sa contribution sur l'échouage des individus. Ceci ne réduit pas le rôle dominant des courants marins, particulièrement dans une zone littorale comme les Pertuis Charentais où les courants tidaux sont forts. Ce type d'étude sur les méduses, avec une fonction de nage à contre courant basée sur des observations *in situ*, n'avait jamais été fait auparavant.

Les méduses sont présentes dans les Pertuis Charentais depuis de nombreuses années. Le Pertuis Breton, la côte d'Aytré et le littoral Sud-Ouest de l'île d'Oléron sont des zones propices à son observation en milieu naturel. Des échouages sur les plages Oléronaises et Rétaises, ainsi que sur les régions avoisinantes, peuvent être observés de manière cyclique tous les étés. Le cycle de *Rhizostoma* est toujours le même avec de grosses concentrations dans le sud du Golfe de Gascogne en hiver puis sur les côtes landaises au printemps puis dans les Pertuis Charentais et enfin, sur les côtes Vendéennes en été. Les jeunes méduses quittent ensuite les Pertuis en automne (Husson and Fay, 1983). *Rhizostoma pulmo* est la méduse principale de ces régions et a été choisie comme modèle biologique afin de répondre aux questions suivantes :

- Le mouvement des méduses, bien que minime, à l'aide de leur ombrelle, contribue-t-il à leur déplacement d'une façon significative ? Est-il uniquement dicté par les courants ?
- Quel rôle joue la nage des méduses dans leur déplacement collectif ?

Pour répondre à ces questions, les observations des trajectoires des méduses et les mesures de leurs vitesses dans le cadre du projet JellyTrack nous ont permis de construire un modèle du transport des *Rhizostoma pulmo* dans le Pertuis Breton. Les simulations numériques ont examiné l'influence du comportement de nage de *Rhizostoma* sur leur dispersion et le taux d'échouage dans le Pertuis Breton.

Tout d'abord, une validation du modèle hydrodynamique avec le suivi de bouées dérivantes a permis de vérifier la qualité des simulations numériques avec un bon accord entre les trajectoires modélisées et les observations. Les résultats, Figure 59, montrent que les trajectoires calculées correspondent à nos attentes, du moins qualitativement.

Les observations de *Rhizostoma* effectuées en 2011 par survol aérien montrent une concordance qualitative avec les observations historiques de 1987. Trois zones à forte densité de *Rhizostoma* ressortent : l'ensemble du Pertuis Breton, avec une densité plus importante au Sud de la Vendée, la baie d'Aytré et la côte Sud-Ouest de l'île d'Oléron. Les mesures des vitesses des méduses se sont faites *in situ* dans le Pertuis Breton. Un accéléromètre a été fixé

sur 18 individus à différents stades de marée. Ces données (Figure 57) ont été retranscrites dans le modèle pour simuler le caractère natatoire des méduses avec une estimation de la vitesse de nage moyenne à 0.05 m/s en direction opposée à celle des courants. Les résultats de ces simulations sont regroupés sous forme de cartes de distribution spatiale, de calculs d'indices de dispersion et d'évaluations de taux d'échouages pour les différents scénarios proposés. La modélisation se divise en six scénarios incluant un comportement de nage, active ou passive, des méduses et trois forçages météorologiques. Ces forçages sont tirés d'analyses des données d'observations du vent durant la période des simulations. Ces observations débouchent sur trois cas : pas de vent, vent moyen et vent fort, venant tous de secteur ouest. Les vents sont considérés comme constants en intensité et en direction durant les simulations. L'analyse des résultats du suivi de particules comparée à la distribution des méduses révèle des caractéristiques intéressantes que nous détaillons ci-dessous.

Premièrement, les zones de rassemblements de *Rhizostoma* simulées concordent avec les observations dans les Pertuis. Les blooms dans le Pertuis Charentais ne semblent pas être dictés par le comportement de nage des méduses mais par les courants de marées. Cependant, les résultats des simulations avec comportement de nage des méduses montrent des améliorations sur la précision des positions des agrégations et sur leur densité de population avec des concentrations plus importantes. Ceci est appuyé par le calcul de l'indice de dispersion qui montre que les méduses sont toujours plus regroupées lorsque le comportement de nage est inclus dans les simulations.

Deuxièmement, les résultats des taux d'échouages de méduses indiquent que le comportement natatoire des méduses contribue à limiter le nombre d'individus qui s'échouent. Les simulations sans vent dévoilent un taux d'échouage de 50% des méduses sans nage alors qu'il n'est que de 3,2% avec celles qui nagent. De même, lors des simulations avec vent moyen, le nombre d'échouages monte à 43,5% sans effet de nage pour chuter à moins de 3% avec effet de nage. Les simulations réalisées avec des vents forts sont différentes avec 58% de méduses échouées pour le cas sans nage et 73% avec nage. Les méduses s'échouent en grand nombre, avec ou sans nage, avec des vents forts. Les résultats démontrent que le fait de nager contre les courants diminue drastiquement le risque d'échouage des méduses. Sur les Figure 75, Figure 76 et Figure 77, on observe des pics d'échouages correspondant aux périodes de revifs. Cette phase de marée est accompagnée de forts courants qui expliquent ces fortes augmentations durant cette période. L'influence du vent reste primordiale et les résultats montrent qu'elle favorise la dispersion des populations de méduses. Le déplacement à contre courant de la marée de *Rhizostoma* atténue grandement le risque d'échouage, ce qui permet d'augmenter leurs chances de survie.

Toutefois, même si les éléments dont nous disposons nous permettent de conclure de façon formelle que le comportement de nage des méduses influence directement leurs chances de survie, ils doivent être complétés par de nouvelles investigations et des travaux supplémentaires.

Les zones géographiques où les méduses sont observées en quantité importante dans les Pertuis sont au nombre de trois. Il a été défini, en accord avec les observations, que la côte

vendéenne serait la zone de départ du groupe de méduses simulées car les mesures *in situ* sur les méduses proviennent de ce site. Des simulations avec les trois zones d'observations n'ont pas pu aboutir pour des problèmes de temps de calcul excessifs, empêchant, entre autre, de tester des simulations avec des méduses disposées de manière homogène sur tout le domaine afin de tester l'influence des courants sur leurs rassemblements en blooms. Cependant, afin de répondre au mieux aux questions sur la dispersion des méduses et leur emplacement dans les Pertuis, ce type de simulations semble tout à fait envisageable.

Les enregistrements de vitesses des méduses sont basés sur un faible nombre d'individus pour chaque stade de marée. Même si ceci ne remet pas en cause les résultats obtenus, un jeu de données plus importantes serait le bienvenue afin de préciser ces valeurs. De plus, la vitesse est considérée comme constante, et certaines études préconisent un mouvement variable dans le temps (Lilley et al., 2009). Le comportement simplifié de déplacement des méduses, avec un comportement allant à contre courant et une vitesse moyenne de nage, tente de se rapprocher au maximum des observations. Pourtant, l'implémentation des effets de la dispersion turbulente avec des marches aléatoires, appelées « random walk », est possible et refléterait mieux les réactions d'un banc de méduses regroupant plusieurs milliers d'individus. Ce processus de dispersion n'est pas pris en compte, la *Rhizostoma octopus* est une méduse dont la taille varie entre 30 et 50 centimètres et qui pèse plus de 5kg et devrait être considérée comme particule inertielle. L'effet de la dispersion turbulente, à son tour, doit être prise en compte avec d'autres processus (Peng and Dabiri, 2009). Ayant pour but d'étudier, d'abord, l'advection et la dispersion des méduses dues à la structure des courants tidaux, l'utilisation d'un modèle 2D reste justifiée en tant que première approche.

Les scénarios utilisent un forçage météorologique basé sur des données de vents qui ont été moyennés sur trois mois. Un vent constant, bien que réalise au vue de l'emprise du domaine, ne l'est pas pour des simulations de 90 jours. Des simulations prenant en compte le vent réel seraient souhaitables afin d'analyser les effets de changements météorologiques transitoires sur le transport des méduses.

Les simulations considèrent que *Rhizostoma* reste à la surface de la mer. Cependant, les observations montrent que les méduses plongent jusqu'à une profondeur de 2m en milieu marin. Les simulations sont donc une simplification du comportement de *Rhizostoma*. Les courants dans un modèle 2D sont moyennés sur la verticale, alors qu'en réalité une méduse en surface subira des courants supérieurs à une méduse en profondeur. Le comportement des méduses simulées est basé sur des règles simples mises en œuvre dans les simulations de trajectoires. Au vue des limitations techniques du modèle, ce comportement ne peut pas être optimisé avec un modèle 2D. Les études utilisant les champs de vecteurs de vitesses afin d'estimer le transport de flotteurs lagrangien appliquent un comportement de nage vertical (Berline et al., 2013). Les champs de vitesse étant calculés avec un modèle en 3D, et donc non-moyennés sur la vertical, ils se rapprochent plus de conditions réelles, étant donné que la méduse alterne entre eaux de surface et eaux plus profondes dans la journée, avec un cycle jour/nuit prononcé (Holst et al., 2007).

Conclusion :

Un modèle hydrodynamique 2D a été appliqué au transport de méduses de genre *Rhizostoma* dans les Pertuis Charentais pour répondre aux principales questions de cette thèse :

« Est-ce que la nage dans la direction opposée aux courants marins affecte le transport et la dispersion des méduses ? Affecte-t-elle ainsi la formation des blooms ? Est-ce que l'échouage des méduses varie si elles adoptent un comportement de nage à contre courant ? »

Les résultats démontrent que le comportement de nage des méduses atténue fortement le risque d'échouages augmentant leurs chances de survie, bien que les conditions météorologiques jouent le rôle prépondérant dans ce processus. Deux types de comportement ont été testés : un comportement passif et un comportement actif. La vitesse et la direction de nage des méduses ont été paramétrées dans le modèle hydrodynamique décrit dans les chapitres II et III. La direction de nage est opposée à celle des courants, avec un seuil minimal dépendant des courants locaux, et la vitesse est constante de 0.05 m/s. Les vitesses et les directions ont été obtenues grâce à une campagne de mesures de *Rhizostoma* dans les Pertuis Charentais en août 2011. Le nombre de *Rhizostoma* et leur distribution ont été quantifiés par survols aériens et correspondent aux observations historiques. Afin de comprendre les réactions de *Rhizostoma* face aux conditions environnementales, et en particulier face aux courants de marée, les vitesses et les directions de nage ont été déterminées par expérimentations *in situ*.

Pour répondre aux questions, la stratégie de modélisation a consisté à modéliser les échanges entre le Sud de la Vendée, qui est une zone avec une forte concentration de méduses, et la zone littorale où les méduses s'échouent et meurent. Les positions initiales des méduses correspondent à une distribution spatiale des méduses en continue dans le temps et spatialement homogène, conformément aux observations. Les résultats montrent les densités de méduses *Rhizostoma* virtuelles transportées par les courants pendant trois mois, avec différentes hypothèses de vitesse de nage, des forçages météorologiques et des lâchers à intervalles réguliers durant 15 jours. Le résultat majeur de cette thèse est que *Rhizostoma* a tendance à être très efficace lorsqu'elle nage, ce qui signifie qu'elle peut largement contribuer à limiter le nombre d'individus qui s'échouent malgré une vitesse de nage assez faible. Ce rôle de nage reste par contre peu important sur leur schéma de dispersion qui semble être dicté par les courants de marée. La répartition des méduses est essentiellement due aux courants qui provoquent la formation de blooms.

Les résultats de ce modèle restent préliminaires, et malgré un effort afin de coller au mieux à la réalité, de nombreux paramètres ne sont pas pris en compte. Une meilleure représentation de leurs vitesses qui peuvent être variables, serait à prendre en compte ainsi que des simulations prenant en compte un vent réel. Le modèle 2D des Pertuis Charentais permet de reproduire correctement les variations du niveau de la mer, des vitesses moyennes de courants tidaux et le mouvement des lignes d'eau sur les estrans intertidaux. Cependant, un modèle 3D est nécessaire pour quantifier la répartition des méduses dans la colonne d'eau. En

effet, les modèles en 3 dimensions permettent de quantifier la répartition des méduses dans la colonne d'eau, de tenir compte des variations verticales des vitesses. Ce genre de modèle nous aurait permis de mieux paramétrer le coefficient de frottement sur le fond et inclure la dispersion turbulente dans le processus du transport des méduses.

Le but de cette étude était de reprendre au mieux les conditions d'observation de *Rhizostoma* dans un cadre hydrodynamique afin de séparer la réponse du comportement natatoire des méduses aux courants et aux conditions de vents. Le modèle, malgré qu'il en soit qu'à un stade préliminaire, a permis de répondre à nos hypothèses. En montrant que comportement de nage de *Rhizostoma*, bien que minime, a un impact direct sur le taux d'échouage. Leurs déplacements semblent aussi favoriser la formation des blooms, même si les courants tidaux en reste la cause majoritaire.

Conclusion générale et perspectives

Bilan de ces travaux

Le projet de cette thèse était fondé sur l'opportunité de disposer de données d'observation comportementales de l'espèce *Rhizostoma pulmo*. Ces données ont permis de décrire la réponse des méduses aux courants marins dans les Pertuis Charentais qui représentent une région où la marée influence grandement l'hydrodynamique côtière. C'est aussi une région à forte densité écologique où la marée rythme le cycle de vie des écosystèmes locaux. La Baie de Marennes-Oléron en est un des lieux marquants avec sa forte activité ostréicole et son patrimoine écologique. Les simulations hydrodynamiques de la marée et du transport des méduses ont été effectuées à l'aide d'un modèle basé sur Telemac 2D, développé dans cette thèse.

Une série de tests a permis de construire un maillage optimal en éléments finis appliqué à l'ensemble des Pertuis Charentais. Les prédictions du modèle de marée ont tout d'abord été confrontées aux enregistrements marégraphiques des variations du niveau marin. La corrélation des données a conduit à proposer plusieurs campagnes de mesures, au phare des Baleineaux et sur l'île d'Aix, afin d'étoffer le corpus de données marégraphiques des Pertuis. L'analyse de ces données a permis de choisir un coefficient de Chézy uniforme de $C = 75 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Nous avons extrait les positions de la ligne d'eau à différentes phases de marée sur les estrans de la Baie de Marennes-Oléron à partir d'images satellites provenant de Landsat et SPOT. Puis les positions des lignes d'eau sur l'estran de Brouage ont été comparées avec celles issues du modèle. Les résultats ont pointé les limites d'un modèle à coefficient de frottement uniforme dans les Pertuis. Ceci nous a conduit à proposer un modèle avec un contraste du coefficient de frottement, avec $C = 100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ dans la Baie de Marennes-Oléron et $C = 75 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ dans le reste des Pertuis Charentais. Cette méthodologie nouvelle, a permis d'obtenir des résultats concordant à la fois avec les mesures marégraphiques et les positions de la ligne d'eau. Le modèle a été validé par des mesures ADCP des courants dans les Pertuis Charentais obtenues par J.-Y. Stanisière. Deux applications directes du modèle ont été proposées. Les temps d'émersion de la Baie de Marennes-Oléron ont ensuite été estimés. Le temps d'émersion est un ingrédient essentiel dans les études du fonctionnement et de la productivité biologique des vasières intertidales. Puis nous avons évalué les temps de renouvellement des trois bassins des Pertuis Charentais. La contribution du vent sur le temps de renouvellement des Pertuis Breton et d'Antioche s'est avérée forte devant les courants de marée, mais leur influence est plus faible sur la Baie de Marennes-Oléron. À l'issue de cette thèse, il apparaît clairement que la méthode des lignes d'eaux est un outil adapté à la validation des modèles hydrodynamiques côtiers établis sur des bancs découvrant. Cette méthode est parfaitement adaptée à des zones littorales en milieu peu profond, difficile d'accès et où les données marégraphiques sont peu nombreuses. C'est également un outil pour suivre l'évolution de la topographie des zones intertidales, faisant également ressortir les imperfections des données bathymétriques.

Nous avons simulé le transport des méduses en tenant compte de leur comportement de nage. Nous avons cherché à comprendre l'influence de leur déplacement individuel sur la formation des blooms et leur échouage. Ces modifications comportementales se sont basées sur des observations dans le Pertuis Breton de *Rhizostoma* obtenues lors de l'été 2011 dans le cadre du projet JellyTrack. Les simulations numériques du transport des méduses avec un comportement de nage constituent une nouvelle approche qui a permis de mettre en avant leur réponse aux courants marins. Les simulations numériques montrent que les déplacements des méduses sont en accord avec les distributions observées en 1983 et lors de l'été 2011. La formation des blooms semble mieux reproduite lorsque le comportement de nage des méduses est pris en compte. Les simulations avec le vent montrent qu'il joue un rôle important dans la redistribution spatiale et temporelle des méduses. Nous en concluons que le comportement individuel de nage des méduses pourrait être une réponse adaptative aux facteurs abiotiques qui menacent la continuité de leur espèce mais que les courants marins restent la cause première de la formation des blooms. Les résultats obtenus dans cette thèse favorisent donc l'hypothèse que la natation des méduses devrait être prise en compte dans les études futures.

Perspectives

La méthode des lignes d'eaux a prouvé sa robustesse et son utilité pour la modélisation hydrodynamique côtière. Une base de données d'images satellitaires plus étoffée avec des lignes d'eaux moins éparées dans le temps permettrait un suivi des changements bathymétriques au cours des années dans les zones découvrantes. Par conséquent, des images provenant d'autres satellites doivent être exploitées. De nouveaux satellites mis en orbite comme Pléiades, Quickbird et SPOT 6 proposent aujourd'hui une résolution inférieure au mètre.

Le développement de simulations numériques en 3D a été évoqué à plusieurs reprises et semblerait être la prochaine étape de modélisation. Dans l'avenir, et pour parvenir à un tel résultat, de nouvelles mesures sont indispensables. Des manipulations avec des colorants et des bouées dérivantes seraient idéales pour mesurer l'effet de la diffusion turbulente des Pertuis. La campagne de suivi des flotteurs de 2013 est une base de départ de ces nouvelles mesures. Développer un modèle 3D serait donc très judicieux mais il ne faut pas oublier que sans observations, cette tâche est inutile.

Les méduses sont très présentes sur les côtes des Pertuis durant la saison estivale. L'origine de ces agrégations, qui participent activement aux blooms et aux échouages des méduses, n'est à ce jour pas quantifiée. Si l'emplacement de *Rhizostoma* durant l'année est à peu près admis à l'heure actuelle, la quantification exacte de leur population durant l'année dans les Pertuis doit être examinée. Un travail de recherches fondamentales écologiques sur le cycle de vie complexe et le rôle de leur écosystème doit être fait. En particulier sur la phase de polype, qui semble concorder aux blooms, dont nous ne connaissons ni la localisation ni les

périodes d'éclosions. Les connaissances sur les méduses restent faibles à ce jour, dans le cas de notre étude, nous ne connaissons toujours pas les raisons de leur arrivée dans les Pertuis. Des informations sur leurs réactions de nage face aux prédateurs et leur mouvement lors de la chasse permettraient de comprendre leur comportement de nage, qui n'est probablement pas dicté uniquement par les courants, mais aussi par les facteurs abiotiques de leur environnement.

Notre dernière réflexion porte sur les méduses. Par définition, les méduses sont catégorisées comme des espèces planctoniques. D'après Hensen (1887), le plancton est l'ensemble des formes animales et végétales vivant en suspension dans les eaux, sans mouvement propre suffisant pour lutter efficacement contre les mouvements de ces eaux, vagues, courants, etc. Il est opposé au necton (Bougis 1967): Ces organismes doivent se propulser dans le milieu aquatique et se déplacent indépendamment des courants. Nous avons montré que les méduses ne peuvent lutter efficacement contre le mouvement des eaux. Mais leur mouvement est bien réel et il a un impact sur l'espèce. La méduse *Rhizostoma*, par exemple, ne dérive pas toute sa vie. Ceci nous pousse à nous demander si les méduses ne correspondraient finalement pas à aucune de ces deux définitions, et elles seraient alors un organisme en limite de ces deux distinctions. La méduse est une espèce particulière, d'autant plus qu'elle a survécu aux cinq grandes périodes d'extinction, et elle mérite donc que l'on s'intéresse plus sur son écologie.

- Abdelrhman, M.A., 2005. Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 62, p.339–351.
- Albert, D.J., 2011. What's on the mind of a jellyfish? A review of behavioural observations on *Aurelia* sp. jellyfish. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 35, p.474–482.
- Allen, J.I., Somerfield, P.J., Gilbert, F.J., 2007. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models. *J. Mar. Syst.* 64, p.3–14.
- Bacher, C., Héral, M., Deslous-Paoli, J.M., Razet, D., 1991. Modèle énergétique uniboite de la croissance des huîtres (*Crassostrea gigas*) dans le bassin de Marennes-Oléron. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48, p.391–404.
- Bacher, C., Sochard, S., Freissinet, C., Sauvaget, P., 2000. Vers une modélisation opérationnelle pour l'aménagement des zones côtières : l'exemple du bassin de Marennes-Oléron (France) Towards an operational modelling for coastal zones management: the example of Marennes-Oléron bay (France). *Houille Blanche* p.8.
- Bars, Y.L., 2010. Modélisation de la dynamique océanique barotrope dans l'estuaire et le plateau amazoniens. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Barusseau, J.P., Martin, G., 1971. Esquisse géologique et structurale des Pertuis Charentais et de leurs abords: *Rev. Geogr Phys Geol Dyn Paris* 2 p.403–412.
- Barz, K., Hinrichsen, H.-H., Hirche, H.-J., 2006. Scyphozoa in the Bornholm Basin (central Baltic Sea)– The role of advection. *J. Mar. Syst.* 60, p.167–176.
- Beck, M.W., Heck Jr, K.L., Able, K.W., Childers, D.L., Eggleston, D.B., Gillanders, B.M., Halpern, B., Hays, C.G., Hoshino, K., Minello, T.J., 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *BioScience* 51, p.633–641.
- Beck, M.W., Heck, K.L., Able, K.W., Childers, D.L., Eggleston, D.B., Gillanders, B.M., Halpern, B.S., Hays, C.G., Hoshino, K., Minello, T.J., 2003. The role of nearshore ecosystems as fish and shellfish nurseries. *Issues Ecol.* 11.
- Bellesort, B., Migniot, C., 1987. De l'estuaire de la Loire à l'estuaire de la Gironde, dans le catalogue sédimentologique des côtes de françaises, côtes de la Manche et de l'Atlantique de la Baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole. *Collect. Dir. Études Rech. D'Électricité Fr.* Eyrolles Paris.
- Berline, L., Zakardjian, B., Molcard, A., Ourmières, Y., Guihou, K., 2013. Modeling jellyfish *Pelagia noctiluca* transport and stranding in the Ligurian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 70, p.90–99.
- Bertin, X., 2005. Morphodynamique séculaire, modélisation et architecture interne d'un système baie/embouchure tidale: le Pertuis de Maumusson et la Baie de Marennes-Oléron. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 198 p.
- Bertin, X., Chaumillon, E., Sottolichio, A., Pedreros, R., 2005. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet, France. *Cont. Shelf Res.* 25, p.1115–1131.
- Bertin, X., Castelle, B., Chaumillon, E., Butel, R., Quique, R., 2008. Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy dissipative beach: St. Trojan beach, SW Oléron Island, France. *Cont. Shelf Res.* 28, p.1316–1332.
- Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A.B., Karpytchev, M., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Model.* 42, p.16–30.

- Blanchard, G.F., Guarini, J.-M., Orvain, F., Sauriau, P.-G., 2001. Dynamic behaviour of benthic microalgal biomass in intertidal mudflats. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 264, p.85–100.
- Bougis, P., 1967. *Le Plancton...*. Presses universitaires de France.
- Boutier, B., Chiffolleau, J.-F., Gonzalez, J.-L., Lazure, P., Auger, D., Truquet, I., 2000. Influence of the Gironde estuary outputs on cadmium concentrations in the waters: consequences on the Marennes-Oléron bay (France). *Oceanol. Acta* 23, p.745–757.
- Bowden, K.F., Krauel, D.P., Lewis, R.E., 1975. Some Features of Turbulent Diffusion from a Continuous Source at Sea, in: *Turbulent Diffusion in Environmental Pollution, Proceedings of a Symposium Held at Charlottesville*. Elsevier, pp. 315–329.
- Brotz, L., Cheung, W.W.L., Kleisner, K., Pakhomov, E., Pauly, D., 2012. Increasing jellyfish populations: trends in Large Marine Ecosystems. *Hydrobiologia* 690, p.3–20.
- Chapman, J.W., Reynolds, D.R., Mouritsen, H., Hill, J.K., Riley, J.R., Sivell, D., Smith, A.D., Woiwod, I.P., 2008. Wind Selection and Drift Compensation Optimize Migratory Pathways in a High-Flying Moth. *Curr. Biol.* 18, p.514–518.
- Chapman, J.W., Klaassen, R.H.G., Drake, V.A., Fossette, S., Hays, G.C., Metcalfe, J.D., Reynolds, A.M., Reynolds, D.R., Alerstam, T., 2011. Animal Orientation Strategies for Movement in Flows. *Curr. Biol.* 21, R861–R870.
- Chevallier, D., Karpytchev, M., McConnell, B. J., Moss, S., & Vincent, C. (2014). Can gray seals maintain heading within areas of high tidal current? Preliminary results from numerical modeling and GPS observations. *Marine Mammal Science*, 30(1), p.374-380.
- Childs, C., 2004. Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. *ArcUser* July-Sept. p.32–35.
- Cohen, J.E., 1997. Estimates of Coastal Populations. *Science* 278, p.1209c–1213.
- Dechambenoy, C., Pontier, L., Sirou, F., Vouve, J., 1977. Contribution of aircraft thermal infrared remote sensing to a knowledge of superficial hydrology in estuaries (Charente, Seudre rivers and Aiguillon Bay). *C R Hebd Seances Acad Sci Paris Ser D* 284, p.1269–1272.
- Determinig, T.S., 1998. Echelles de temps déterminant, ou déterminées par, les écoulements des fluides géophysiques. *Bull. Société R. Sci. Liège* 67, p.43.
- Do nascimento Joana, 2013. Pêche récréative ou commerciale : Quel impact sur les stocks d'étrilles (Necora Puber) européennes ? Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 273 p.
- Donnard, T., 2012. Les proliférations et invasions du zooplancton gélatineux sur les côtes françaises. Rapport programme OCEANS.
- Doodson, A.T., 1921. The harmonic development of the tide-generating potential. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* 100, p.305–329.
- Dyer, K.R., 1997. *Estuaries: a physical introduction*, 195 p.
- Ezer, T., Mellor, G.L., 2000. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model. *Dyn. Atmospheres Oceans* 32, p.185–208.
- Fontugne, M.R., Jouanneau, J.-M., 1987. Modulation of the particulate organic carbon flux to the ocean by a macrotidal estuary: Evidence from measurements of carbon isotopes in organic matter from the Gironde system. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 24, p.377–387.
- Foreman, M.G.G., 1977. *Manual of tidal heights analysis and prediction*. Pacific Marine sciences Report 77-10. Institute of Ocean Sciences. Victoria. Br. Columbia.
- Forsskål, P., Niebuhr, C., 1775. *Descriptiones animalium, avium, amphibiorum, piscium, insectorum, vermium / quae in itinere orientali observavit Petrus Forsskål. Post mortem auctoris edidit Carsten Niebuhr. Adjuncta est materia medica kahirina atque tabula maris Rubri geographica. ex officina Mölleri,, Hauniæ : ex officina Mölleri.*

- Fossette, S., Putman, N.F., Lohmann, K.J., Marsh, R., Hays, G.C., 2012. A biologist's guide to assessing ocean currents: a review. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 457, p.285–301.
- Fossette, S., Chalumeau, J., Gleiss, A., Armstrong, C., Bastian, T., Vandenabeele, S., Karpytchev, M., Hays, G., In prep. Swim or strand: Particle tracking model reveals the importance of oriented swimming behaviour to jellyfish survival.
- Fuentes, V., Straehler-Pohl, I., Atienza, D., Franco, I., Tilves, U., Gentile, M., Acevedo, M., Olariaga, A., Gili, J.-M., 2011. Life cycle of the jellyfish *Rhizostoma pulmo* (Scyphozoa: Rhizostomeae) and its distribution, seasonality and inter-annual variability along the Catalan coast and the Mar Menor (Spain, NW Mediterranean). *Mar. Biol.* 158, p.2247–2266.
- Garraffo, Z.D., Mariano, A.J., Griffa, A., Veneziani, C., Chassignet, E.P., 2001. Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic: I. Comparison with in situ drifter data. *J. Mar. Syst.* 29, p.157–176.
- Germain, P., Salomon, J.C., 1991. Transport d'éléments à l'état de traces dans les eaux côtières de la manche: étude de la distribution spatiale d'un traceur radioactif (106Ru-Rh) Dans les moules et les fucus, in: Kershaw, P.J., Woodhead, D.S. (Eds.), *Radionuclides in the Study of Marine Processes*. Springer Netherlands, pp. 364–364.
- Geyer, W.R., Morris, J.T., Prahl, F.G., Jay, D.A., 2000. Interaction between physical processes and ecosystem structure: a comparative approach. p.177–206.
- Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-ocean Dynamics*. Academic Press; 684 p.
- Gouleau, D., Jouanneau, J.M., Weber, O., Sauriau, P.G., 2000. Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-Oleron Bay (France). *Cont. Shelf Res.* 20, p.1513–1530.
- Gouriou, T., 2012. Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18e siècle en Charente-Maritime. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 579 p.
- Graham, W.M., Pages, F., Hamner, W.M., 2001. A physical context for gelatinous zooplankton aggregations: a review. *Hydrobiologia* 451, p.199–212.
- Guizien, K., Dupuy, C., Ory, P., Montanié, H., Hartmann, H., Chatelain, M., Karpytchev, M., In press. Microorganism dynamics during a rising tide: Disentangling effects of resuspension and mixing with offshore waters above an intertidal mudflat.
- Hall, P., Davies, A., 2005. Comparison of finite difference and element models of internal tides on the Malin–Hebrides shelf. *Ocean Dyn.* 55, p.272–293.
- Haq, B.U., Haq, S.M., Kullenberg, G., Stel, J.H., 1998. Coastal zone management imperative for maritime developing nations. *Oceanogr. Lit. Rev.* 45, p.1667–1668.
- Hays, G.C., Bastian, T., Doyle, T.K., Fossette, S., Gleiss, A.C., Gravenor, M.B., Hobson, V.J., Humphries, N.E., Lilley, M.K.S., Pade, N.G., Sims, D.W., 2012. High activity and Lévy searches: jellyfish can search the water column like fish. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 279, p.465–473.
- Hearn, C.J., 2008. *The Dynamics of Coastal Models*. Cambridge University Press.
- Hermida, J., Lazure, P., Froidefond, J.M., Jegou, A.M., Castaing, P., 1998. La dispersion des apports de la Gironde sur le plateau continental. Données in situ, satellitaires et numériques. *Oceanol. Acta* 21, p.209–221.
- Hervouet, J.M., 2001. *TELEMAC-2D version 3.0 HE-43/94/052/A*. Rapport technique.
- Hervouet, J.M., 2003. *Hydrodynamique des écoulements à surface libre: modélisation numérique avec la méthode des éléments finis*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

- Holst, S., Sötje, I., Tiemann, H., Jarms, G., 2007. Life cycle of the rhizostome jellyfish *Rhizostoma octopus* (L.) (Scyphozoa, Rhizostomeae), with studies on cnidocysts and statoliths. *Mar. Biol.* 151, p.1695–1710.
- Houghton, J.D.R., Doyle, T.K., Davenport, J., Lilley, M.K., Wilson, R.P., Hays, G.C., 2007. Stranding events provide indirect insights into the seasonality and persistence of jellyfish medusae (Cnidaria: Scyphozoa). *Hydrobiologia* 589, p.1–13.
- Husson, B., Fay, S., 1983. Répartition, fréquence et régime alimentaire de la méduse *Rhizostoma Pulmo*. In *Annales de la Société des Sciences naturelles de la Charente-Maritime* Vol. 7, pp. 231-252.
- IGN, 2012. Litto3D® – v 1.0 Spécifications techniques Version du document 1.4. Rapport technique.
- Jenkins, W.J., 2006. Tracers of ocean mixing. *Oceans Mar. Geochem.* p.223.
- Johnson, D.R., Perry, H.M., Burke, W.D., 2001. Developing jellyfish strategy hypotheses using circulation models. *Hydrobiologia* 451, p.213–221.
- Johnson, D.R., Perry, H.M., Graham, W.M., 2005. Using nowcast model currents to explore transport of non-indigenous jellyfish into the Gulf of Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 305, p.139–146.
- Jones, J., Davies, A., 2005. An intercomparison between finite difference and finite element (TELEMAC) approaches to modelling west coast of Britain tides. *Ocean Dyn.* 55, p.178–198.
- Klingebiel, A., De Resseguier, A., Tesson, M., 1971. Contributions à l'étude de la circulation des masses d'eau dans le bassin de Marennes-Oléron, C. R Acad Sei Paris 273, p.1783–1786.
- Klingebiel, A., Tesson, M., 1974. Etudes d'environnement dans les baies du littoral charentais. 2e C. O Bordx. Fr. 2, p.17.
- Lazure, P., 1998. Modélisation 3D de l'évolution saisonnière des panaches de la Loire et de la Gironde. *Oceanol. Acta* 21, p.165–177.
- Le Hir, P., Roberts, W., Cazaillet, O., Christie, M., Bassoullet, P., Bacher, C., 2000. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Cont. Shelf Res.* 20, p.1433–1459.
- Lefevre, F., 2000. Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale: assimilation de données in situ et altimétriques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, 286 p.
- Legrand, S., Deleersnijder, E., Delhez, E., Legat, V., 2007. Unstructured, anisotropic mesh generation for the Northwestern European continental shelf, the continental slope and the neighbouring ocean. *Cont. Shelf Res.* 27, p.1344–1356.
- Leguerrier, D., Niquil, N., Petiau, A., Bodoy, A., 2004. Modeling the impact of oyster culture on a mudflat food web in Marennes-Oleron Bay (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 273, p.147–161.
- Levin, B.W., Kaistrenko, V.M., Rybin, A.V., Nosov, M.A., Pinegina, T.K., Razzhigaeva, N.G., Sasorova, E.V., Ganzei, K.S., Ivel'skaya, T.N., Kravchunovskaya, E.A., Kolesov, S.V., Evdokimov, Y.V., Bourgeois, J., MacInnes, B., Fitzhugh, B., 2008. Manifestations of the tsunami on November 15, 2006, on the central Kuril Islands and results of the runup heights modeling. *Dokl. Earth Sci.* 419, p.335–338.
- Lewis, R., 1997. Dispersion in estuaries and coastal waters. Wiley Chichester, UK.
- Lilley, M. k. s., Houghton, J. d. r., Hays, G. c., 2009. Distribution, extent of inter-annual variability and diet of the bloom-forming jellyfish *Rhizostoma* in European waters. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 89, p.39–48.
- Lozano, I., Swail, V., 2002. The link between wave height variability in the north Atlantic and the storm track activity in the last four decades. *Atmosphere-Ocean* 40, p.377–388.
- Luketina, D., 1998. Simple Tidal Prism Models Revisited. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 46, p.77–84.

- Macur, O., 1999. Etude des courants de marée dans les pertuis charentais (No. 564). rapport de recherche, Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine.
- Mason, D.C., Davenport, I.J., Flather, R.A., 1997. Interpolation of an intertidal digital elevation model from heightened shorelines: A case study in the western Wash. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 45, p.599–612.
- Matanoski, J.C., Hood, R.R., Owens, R.L., Purcell, J.E., 2004. Patterns in swimming by a scyphomedusa: a novel approach to quantifying behavior in individuals. *Mar. Biol.* 145, p.303–313.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Our Human Planet: Summary for Decision Makers. Island Press.
- Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V., Monismith, S.G., 2002. A Comment on the Use of Flushing Time, Residence Time, and Age as Transport Time Scales. *Limnol. Oceanogr.* 47, p.1545–1553.
- Moon, J.-H., Pang, I.-C., Yang, J.-Y., Yoon, W.D., 2010. Behavior of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in the East China Sea and East/Japan Sea during the summer of 2005: A numerical model approach using a particle-tracking experiment. *J. Mar. Syst.* 80, p.101–114.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, p.853–858.
- Nicolle, A., 2006. Modélisation des marées et des surcotes dans les Pertuis Charentais. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 307 p.
- Nicolle, A., Karpytchev, M., 2007. Evidence for spatially variable friction from tidal amplification and asymmetry in the Pertuis Breton (France). *Cont. Shelf Res.* 27, p.2346–2356.
- Nishikawa, J., Thu, N.T., Ha, T.M., Thu, P.T., 2008. Jellyfish fisheries in northern Vietnam. *Plankton Benthos Res.* 3, p.227–234.
- Nixon, S.W., Oviatt, C.A., Frithsen, J., Sullivan, B., 1986. Nutrients and the productivity of estuarine and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. South. Afr.* 12, p.43–71.
- Orbi, A., 1986. Circulation de marée dans le golfe Normand-breton. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 163 p.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.* 28, p.929–937.
- Peng, J., Dabiri, J.O., 2009. Transport of inertial particles by Lagrangian coherent structures: application to predator–prey interaction in jellyfish feeding. *J. Fluid Mech.* 623, p.75–84.
- Pingree, R.D., 1983. Spring tides and quadratic friction. *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* 30, p.929–944.
- Pingree, R.D., Griffiths, D.K., 1987. Tidal friction for semidiurnal tides. *Cont. Shelf Res.* 7, p.1181–1209.
- Plus, M., Maurer, D., Stanisiere, J.-Y., Dumas, F., 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d’une lagune mésotidale, le Bassin d’Arcachon. Rapport de recherche, Ifremer, 54 p.
- Poirier, C., 2010. Enregistrements sédimentaires des changements environnementaux séculaires à millénaires par la micro- et la macrofaune benthique littorale. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 216 p.
- Post, J.C., Lundin, C.G., Mundial, B., 1996. Guidelines for integrated coastal zone management. World Bank Washington, DC.
- Proudman, J., 1953. Dynamical oceanography. Methuen.

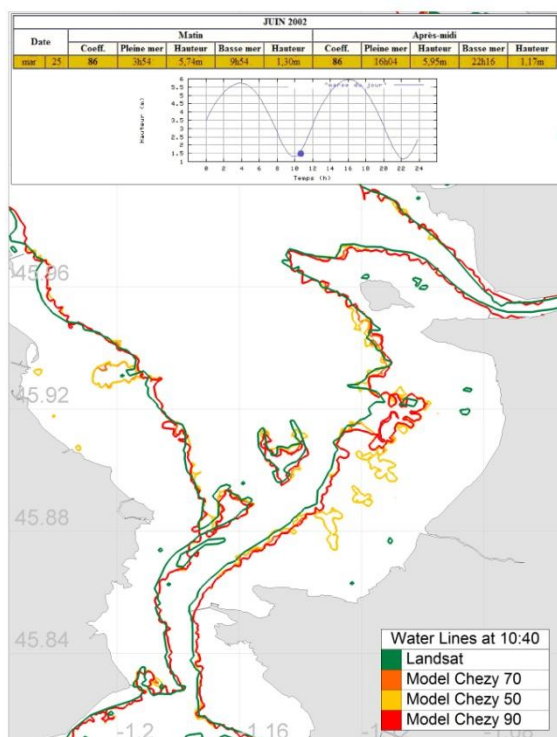
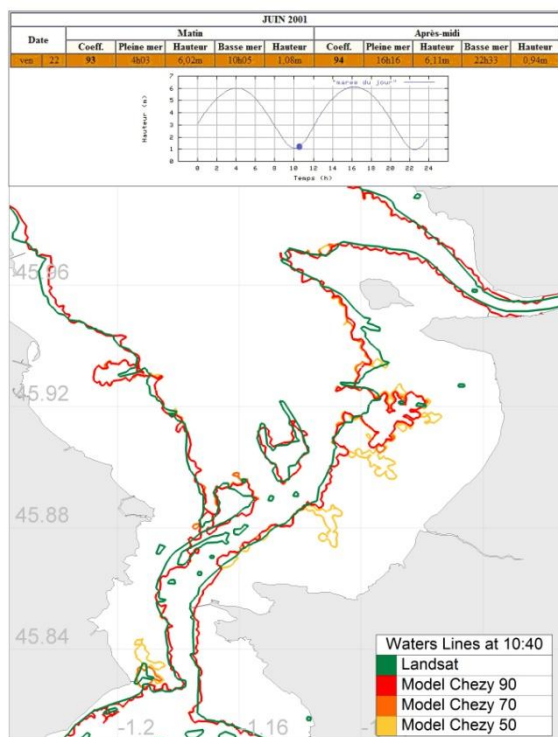
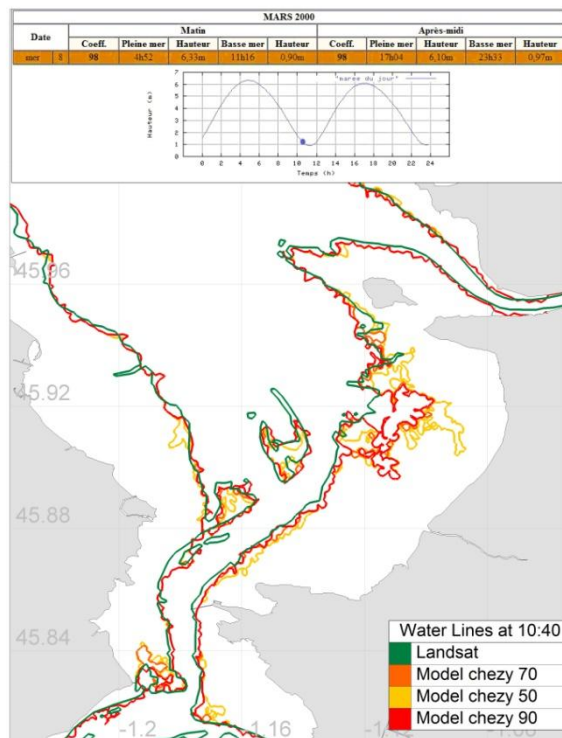
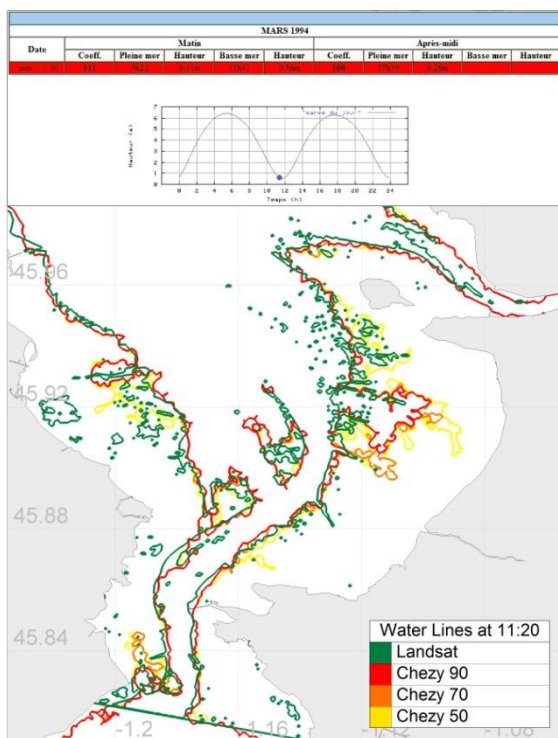
- Purcell, J.E., 2012. Jellyfish and Ctenophore Blooms Coincide with Human Proliferations and Environmental Perturbations. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4, p.209–235.
- Quéguiner, B., 2009. Introduction à l'Etude des Traceurs Géochimiques. Cent. D'Océanologie Marseille Aix-Marseille Univ. CNRS LOPB UMR 6535 Lab. D'Océanographie Biogéochim. OSU Centre D'Océanologie de Marseille.
- Rakow, K.C., Graham, W.M., 2006. Orientation and swimming mechanics by the scyphomedusa *Aurelia* sp. in shear flow. *Limnology and oceanography* 51 : p.1097-1106.
- Ravail, B., Heral, M., Maestrini, S., Robert, J.-M., 1988. Incidence du débit de la Charente sur la capacité biotique du bassin ostréicole de Marennes-Oléron. *J. Rech. Océan.* 13, p.48–52.
- Richardson, A.J., Bakun, A., Hays, G.C., Gibbons, M.J., 2009. The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. *Trends Ecol. Evol.* 24, p.312–322.
- Riisgård, H.U., Madsen, C.V., 2011. Clearance rates of ephyrae and small medusae of the common jellyfish *Aurelia aurita* offered different types of prey. *J. Sea Res.* 65, p.51–57.
- Rossignol, L., 2005. L'impact de la Gironde sur la qualité des eaux dans les pertuis Charentais. rapport de fin d'études, Université de la Rochelle.
- Rostagno, B., Violleau, A., Brun, C., Dietrich, P., Fillon, A., Goulletquer, P., Guichet, R., Kantin, R., Legay, D., Loubersac, L., Masson, D., Rocher, G., Ryckaert, M., Thomas, G., Fichet, D., Guyot, T., Miramand, P., Pigeot, J., Seguignes, M., 1999. Qualité des eaux littorales des Pertuis Charentais : Bilan et diagnostic. Rapport de recherche, Ifremer, 160 p.
- Ryu, J.-H., Won, J.-S., Min, K.D., 2002. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat a case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sens. Environ.* 83, p.442–456.
- Saint-Béat, B., 2012. Modélisation du rôle du biofilm dans le fonctionnement du réseau trophique de la vasière de Brouage (Bassin de Marennes-Oléron) : influence sur les flux de carbone et conséquences sur la stabilité. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 320 p.
- Sale, A., Luschi, P., 2009. Navigational challenges in the oceanic migrations of leatherback sea turtles. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 276, p.3737–3745.
- Shanks, A.L., Eckert, G.L., 2005. population persistence of California current fishes and benthic crustaceans. A marine drift paradox. *Ecol. Monogr.* 75, p.505–524.
- Shillinger, G.L., Lorenzo, E.D., Luo, H., Bograd, S.J., Hazen, E.L., Bailey, H., Spotila, J.R., 2012. On the dispersal of leatherback turtle hatchlings from Mesoamerican nesting beaches. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 279, p.2391–2395.
- Simon, B., Gonella, J., 2007. La marée océanique côtière. Institut océanographique, 443 p.
- Simpson, M.J., Clement, T.P., 2003. Comparison of finite difference and finite element solutions to the variably saturated flow equation. *J. Hydrol.* 270, p.49–64.
- Small, C., Nicholls, R.J., 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.* p.584–599.
- Soletchnik, P., Fauray, N., Razet, D., Goulletquer, P., 1998. Hydrobiology of the Marennes-Oleron Bay. Seasonal indices and analysis of trends from 1978 to 1995. *Hydrobiologia* 386, p.131–146.
- Soletchnik, P., Le Moine, O., Fauray, N., Razet, D., Geairon, P., Goulletquer, P., 1999. Mortalité de l'huître *Crassostrea gigas* dans le bassin de Marennes-Oléron: étude de la variabilité spatiale de son environnement et de sa biologie par un système d'informations géographiques (SIG). *Aquat. Living Resour.* 12, p.131–143.
- Soulsby, R.L., 1983. Chapter 5 The Bottom Boundary Layer of Shelf Seas, in: B. Johns (Ed.), Elsevier Oceanography Series. Elsevier, pp. 189–266.

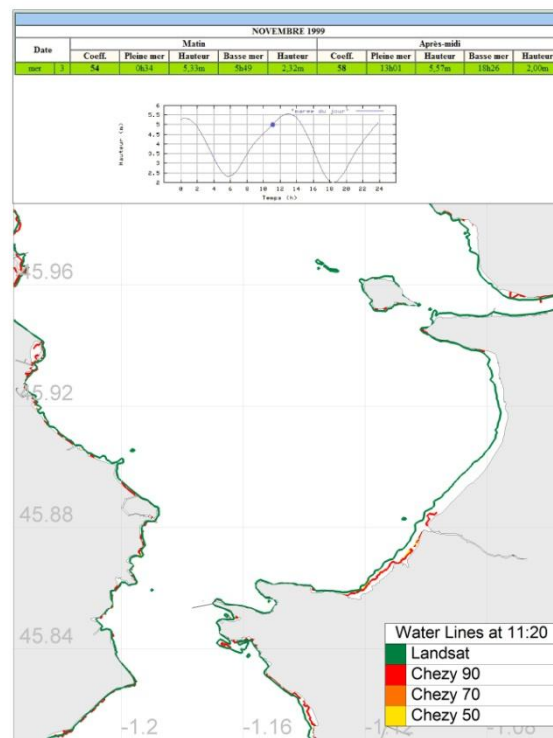
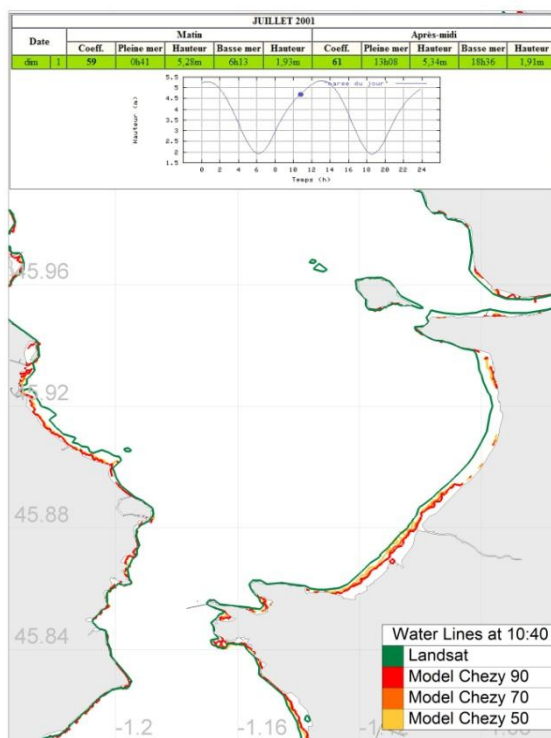
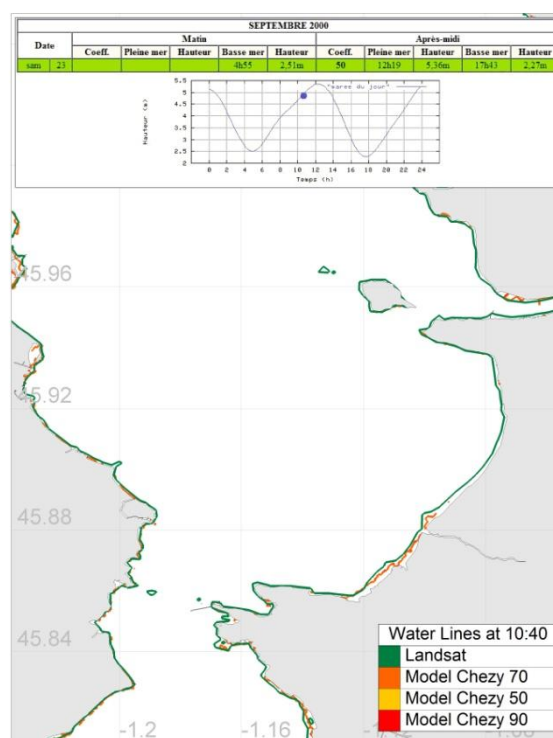
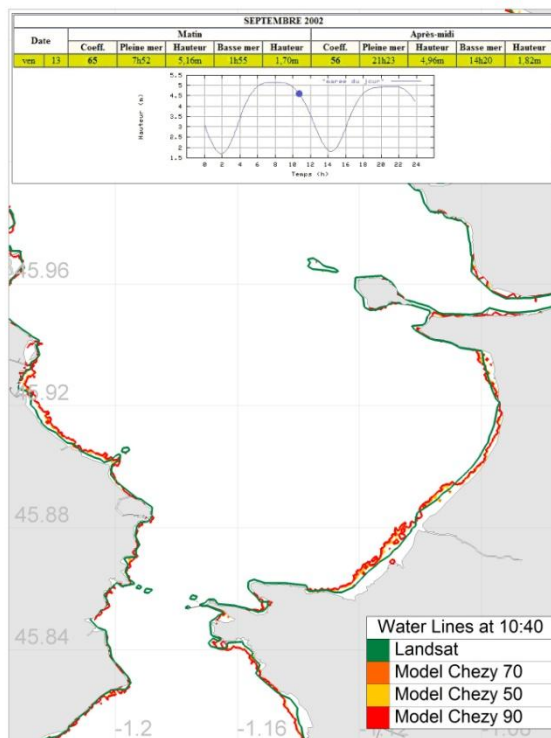
- Soulsby, R., 1997. *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford.
- Speer, P.E., Aubrey, D.G., 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 21, p.207–224.
- Stanisiere, J.-Y., Dumas, F., Plus, M., Maurer, D., Robert, S., 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron. Rapport de recherche, Ifremer, 112 p.
- Stanisiere, J.-Y., Le Moine, O., Soletchnik, P., 2008. Morphologie et hydrodynamique comparées des pertuis charentais : résultats de modélisation par Mars 2D. Presented at the 36ème Salon National du Matériel Ostréicole, Mytilicole, Cultures Marines et Pêche, Poster presentation.
- Struski, C., 2005. Modélisation des flux de matières dans la Baie de Marennes-Oléron : couplage de l'hydrodynamisme, de la production primaire et de la consommation par les huîtres. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 340 p.
- Tesson, M., 1973. Aspects dynamiques de la sédimentation dans la baie de Marennes Oléron, Université de Bordeaux I. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- Thomann, R.V., Mueller, J.A., 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper & Row, Publishers.
- Thomas, G., Kantin, R., Heral, M., 1999. La Charente, un estuaire conchylicole. *Rev. Inf. Ifremer Rech. Mar.* p.20–25.
- Thorup, K., Alerstam, T., Hake, M., Kjellén, N., 2006. Traveling or stopping of migrating birds in relation to wind: an illustration for the osprey. *Behav. Ecol.* 17, p.497–502.
- Walker, S.E., 2011. Density and dispersion. *Nat. Educ. Knowl.* 2, p. 3.
- Weber, N., Chaumillon, E., Tesson, M., Garlan, T., 2004. Architecture and morphology of the outer segment of a mixed tide and wave-dominated-incised valley, revealed by HR seismic reflection profiling: the paleo-Charente River, France. *Mar. Geol.* 207, p.17–38.
- White, K., El Asmar, H.M., 1999. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology* 29, p.93–105.
- Wikelski, M., Moskowicz, D., Adelman, J.S., Cochran, J., Wilcove, D.S., May, M.L., 2006. Simple rules guide dragonfly migration. *Biol. Lett.* 2, p.325–329.
- Wöppelmann, G., Letetrel, C., Santamaria, A., Bouin, M.-N., Collilieux, X., Altamimi, Z., Williams, S.D.P., Miguez, B.M., 2009. Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters*, 36(12).
- Wright, J., Team, O.U.O.C., 1999. *Waves, Tides, and Shallow-water Processes*. Butterworth-Heinemann.
- Yahia, D., Goy, J., Daly Yahia-Kéfi, O., 2003. Distribution et écologie des Méduses (Cnidaria) du golfe de Tunis (Méditerranée sud occidentale). *Oceanol. Acta* 26, p.645–655.
- Zavodnik, D., 1987. Spatial aggregations of the swarming jellyfish *Pelagia noctiluca* (Scyphozoa). *Mar. Biol.* 94, p.265–269.
- Zimmerman, J.T.F., 1988. Estuarine residence times. *Hydrodynamics Estuaries*, vol 1. (Kjerfve, B., ed.). CRC Press, Boca Raton, p. 75–84.

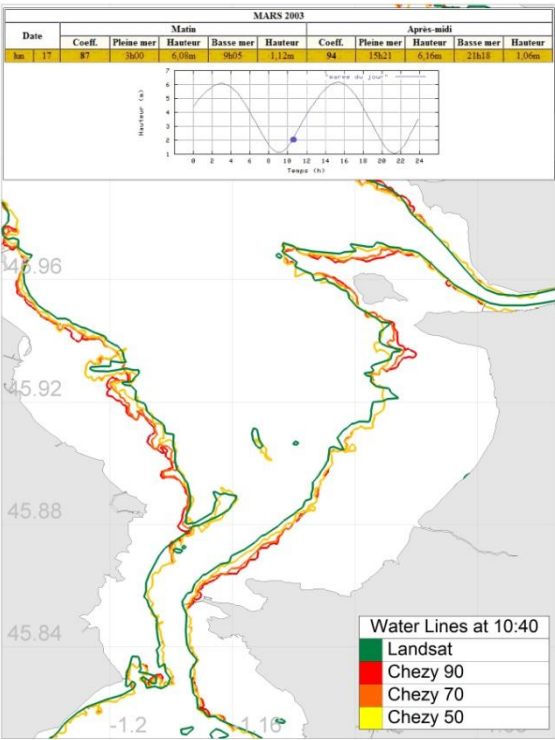
Annexe A

Résultats des lignes d'eau observées et modélisées pour chaque image satellite.

Avec la date et la phase de marée correspondante.







Annexe B

Modèle hydrodynamique 3D

Afin de répondre plus en détails aux questions apportées par le transport de particules et la circulation de courants dans notre zone d'étude, il a été décidé de tester le logiciel Telemac 3D. La validation hydrodynamique du modèle est réalisée comme dans la partie précédente dans le modèle 2D, en comparant les mesures de vitesses moyennées sur la profondeur des profils de courants obtenus avec les ADCP.

Résultats

Afin de pouvoir comparer le modèle 3D au modèle 2D, les vitesses et les hauteurs d'eau ont été analysées sous la même forme. Les résultats de vitesse du modèle 3D ont été extraits par plans, puis moyennés sur la hauteur d'eau. L'ensemble des points de mesures se trouvent à la suite (Figure 1-Figure 10).

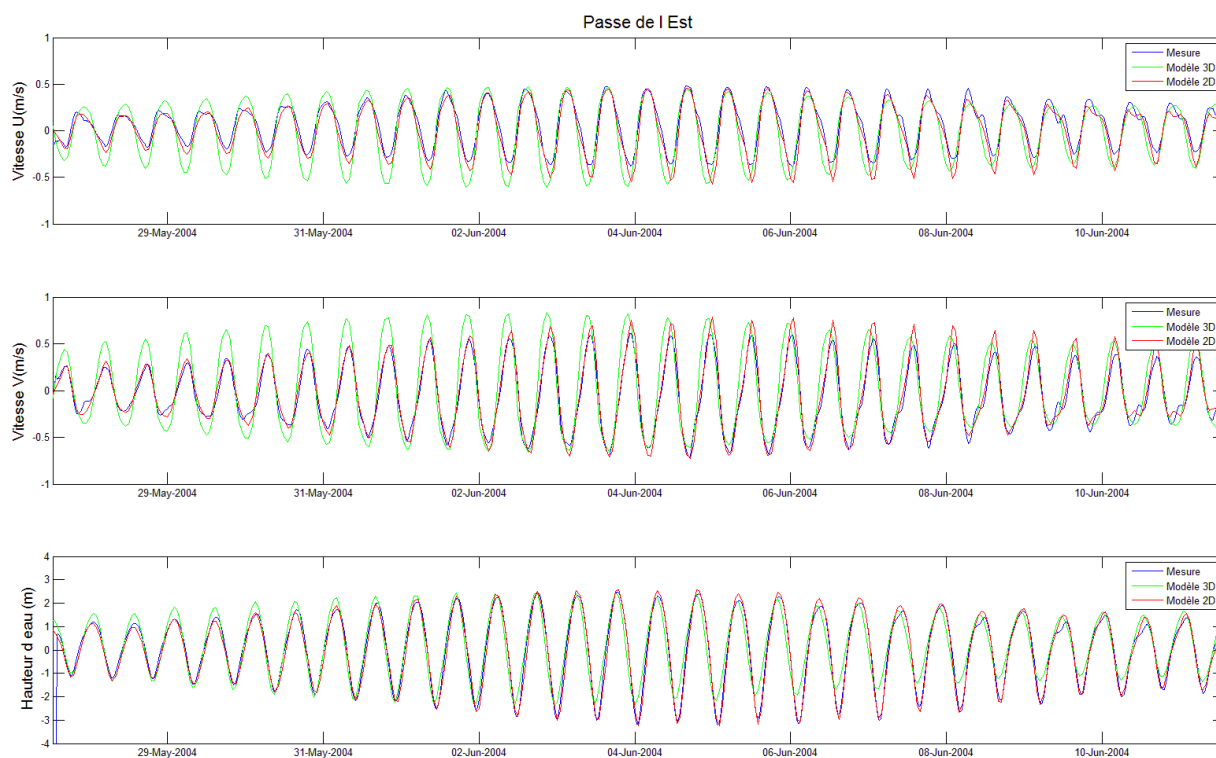


Figure 1 : Composantes U , V moyennées sur la verticale et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Est

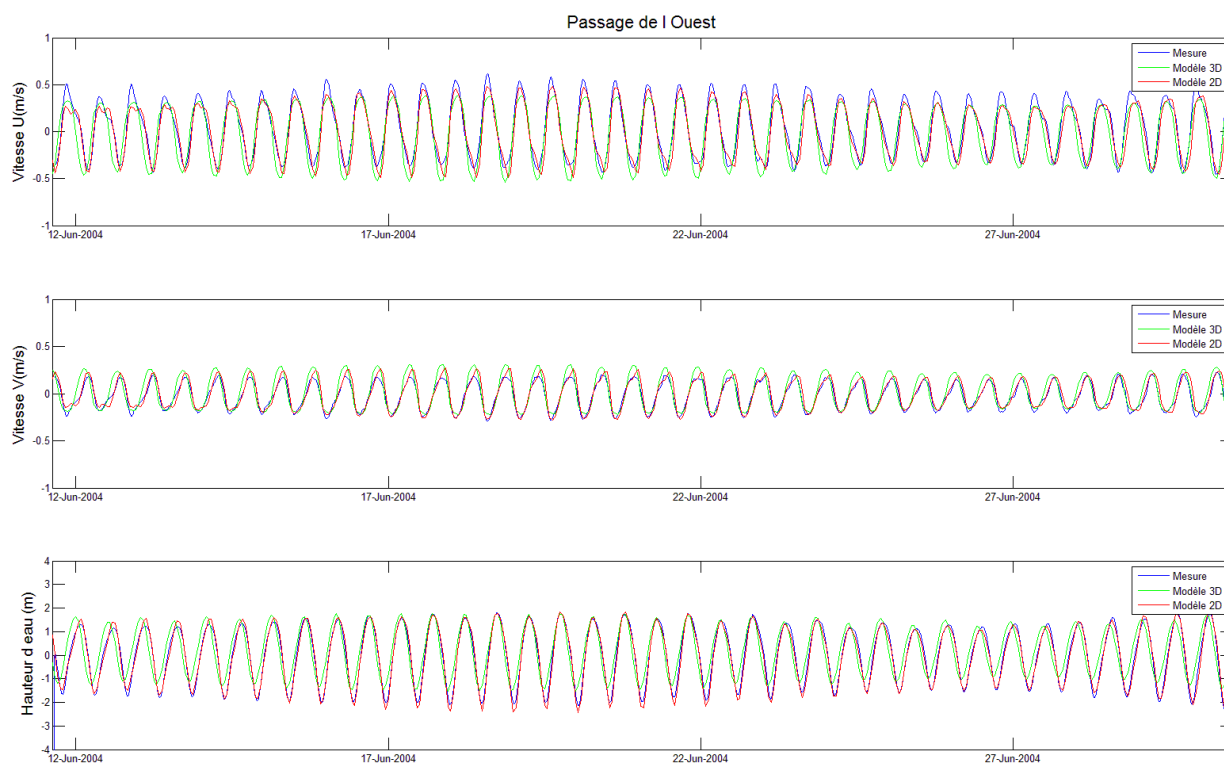


Figure 2: Composantes U , V moyennées sur la verticale et hauteur d'eau mesurées et simulées au passage de l'Ouest

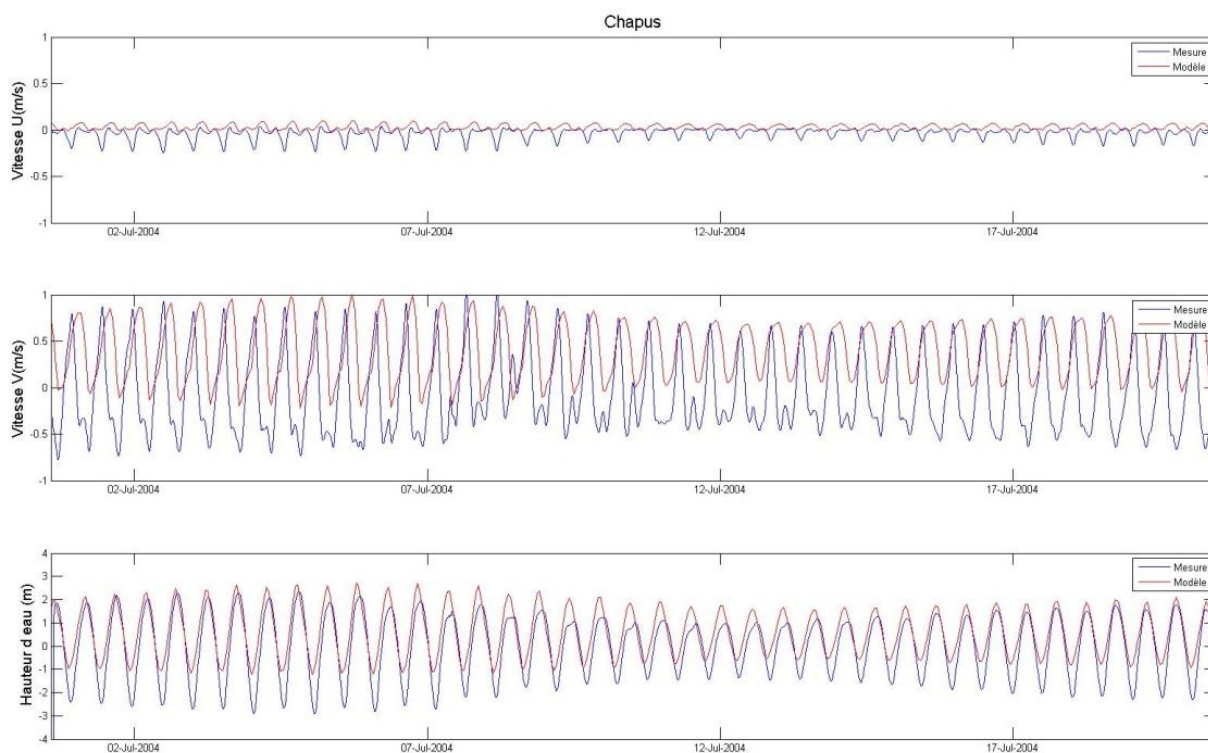


Figure 3 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées pour le modèle 3D au Chapus

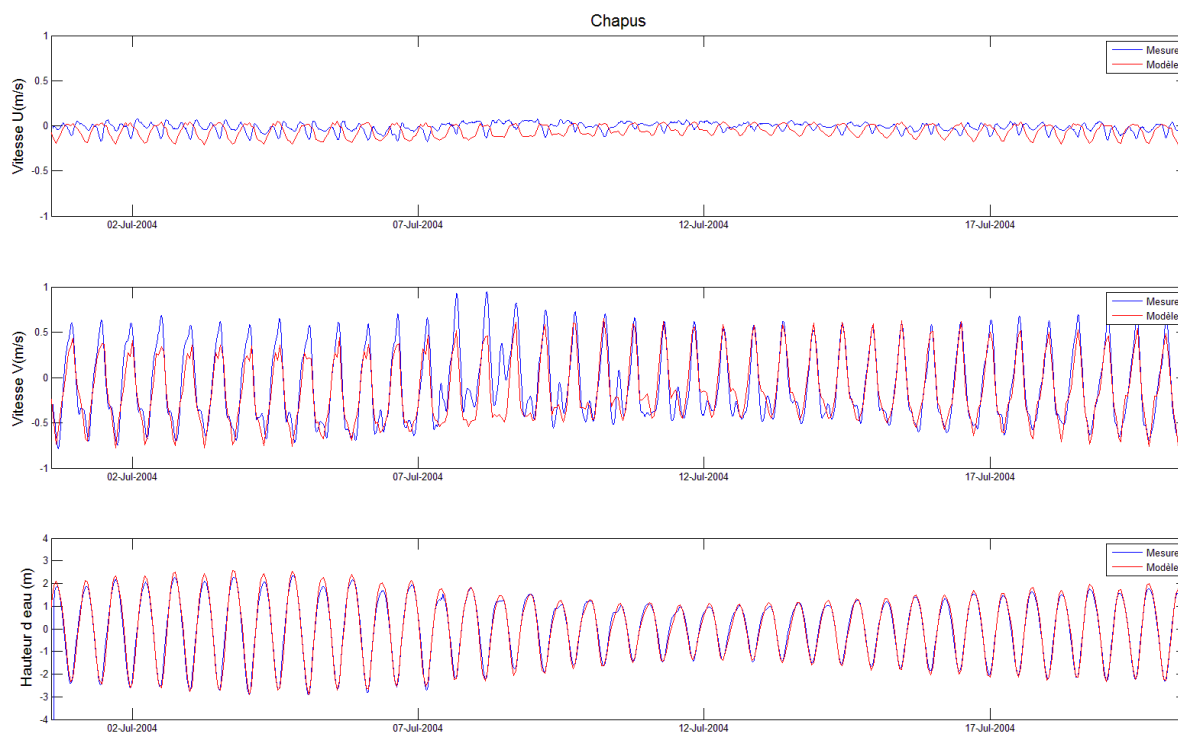


Figure 4 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées pour le modèle 2D au Chapus

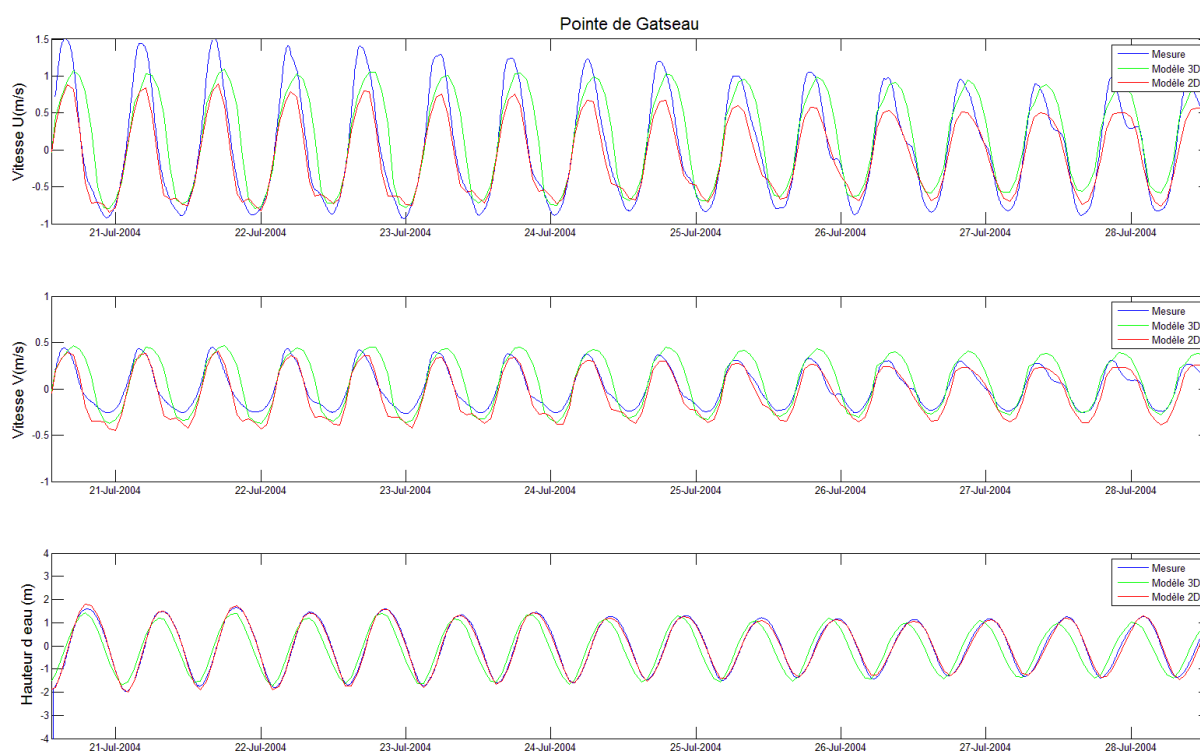


Figure 5 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Gatseau

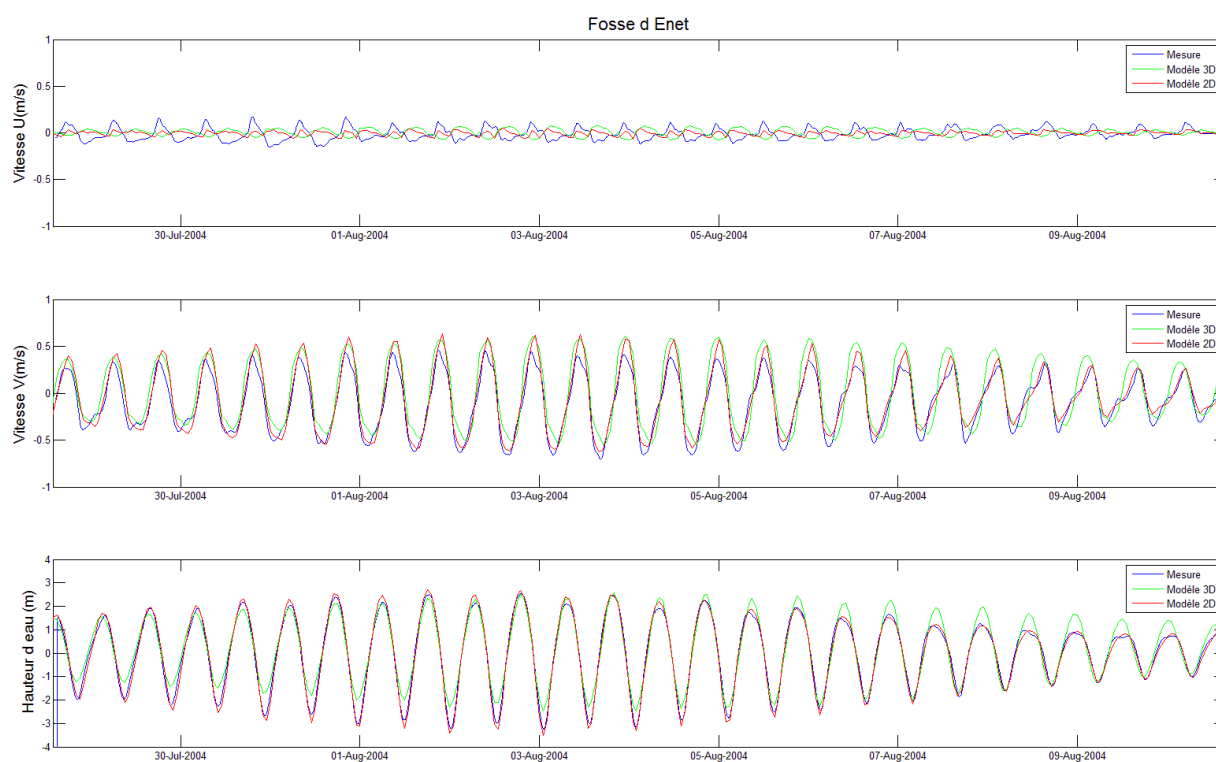


Figure 6 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées dans la fosse d'Enet

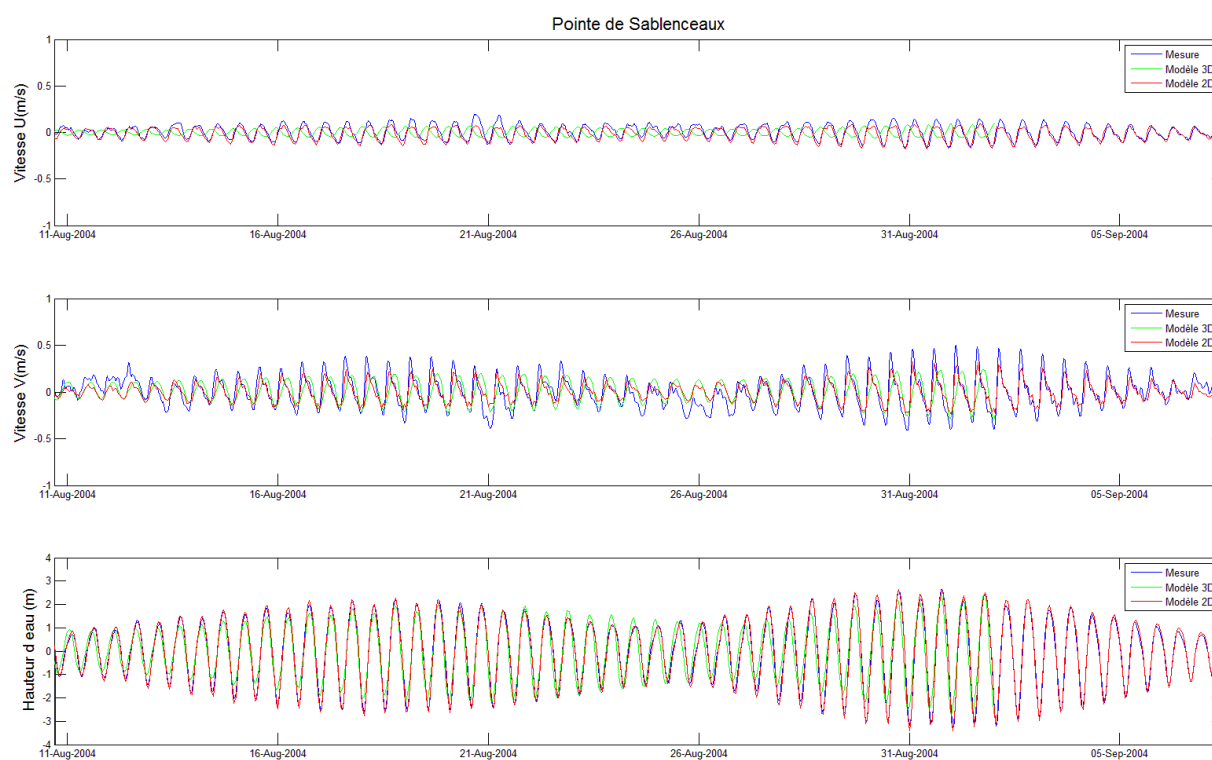


Figure 7 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées à la pointe de Sablanceaux

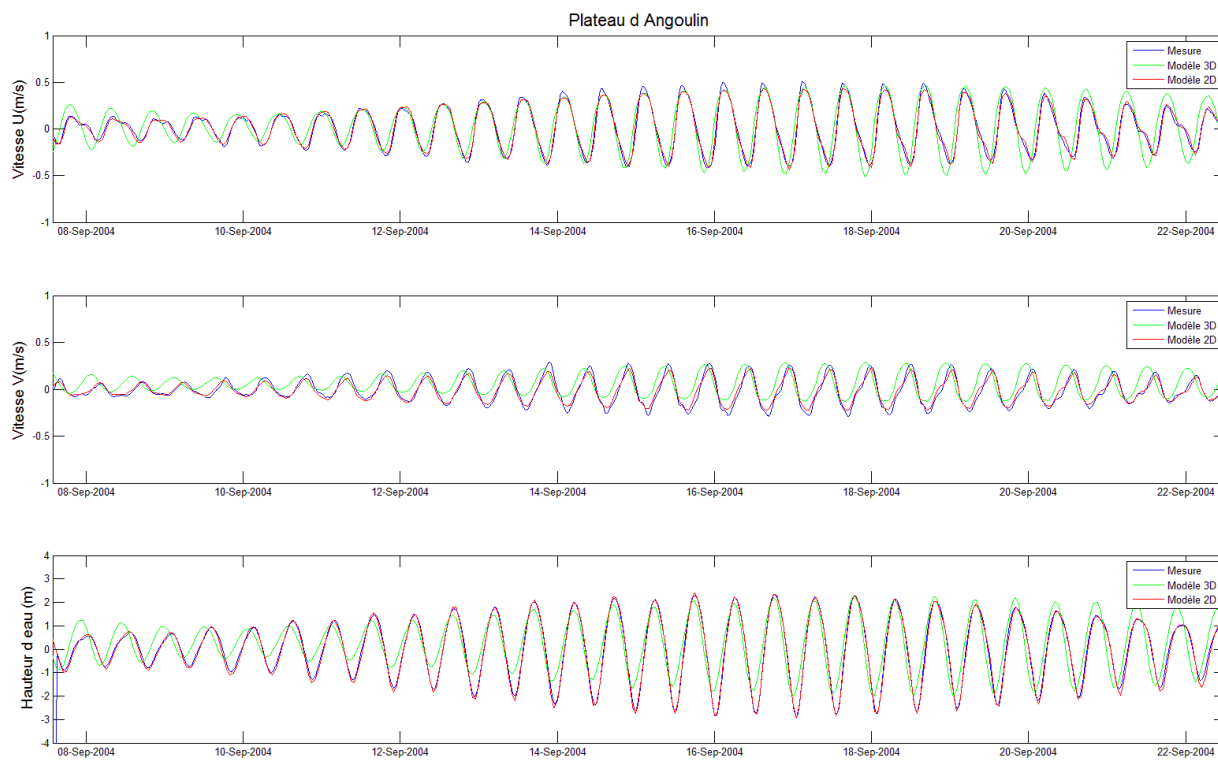


Figure 8 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées sur le plateau d'Angoulin

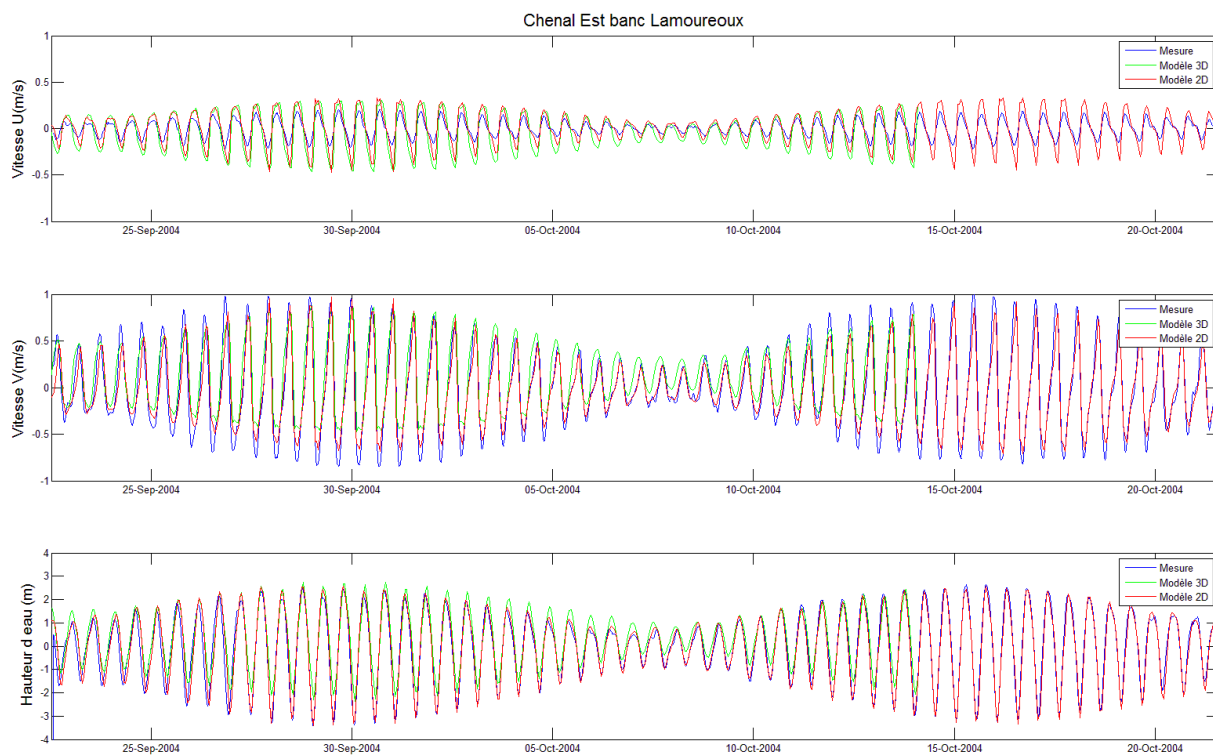


Figure 9 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Est du banc de Lamoureux

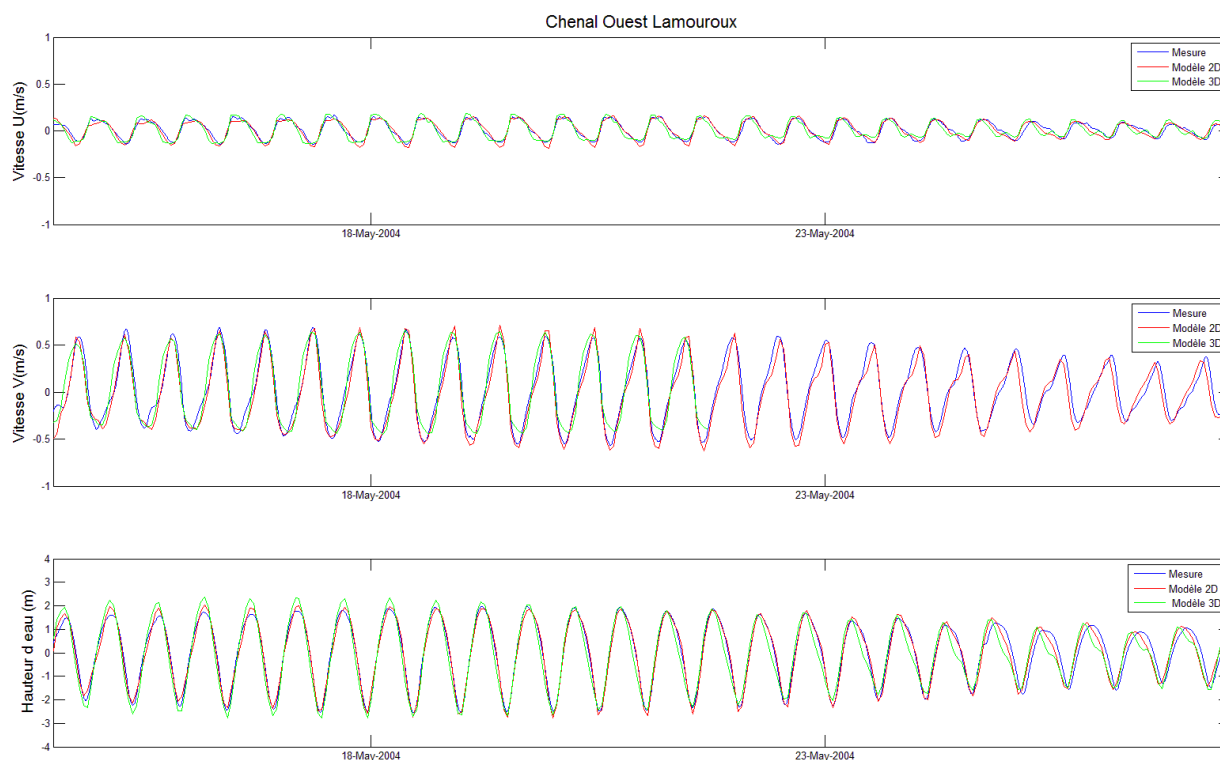


Figure 10 : Composantes U , V et hauteur d'eau mesurées et simulées au Chenal Ouest du banc de Lamouroux

Hauteur d'eau

Les résultats d'élévation de la surface libre obtenue dans les Pertuis sont comparés aux mesures d'ADCP. Ces résultats présentent des divergences par rapport au modèle 2D. On observe des différences d'hauteur d'eau de quelques centimètres à une dizaine de centimètres en particulier à la basse mer et à la pleine mer.

Marée basse : L'ensemble des points de simulation sous-estime la basse mer avec des résultats supérieurs aux observations. Le passage de l'Est est au-dessus, notamment lors de la transition entre les phases de vive-eau et morte-eau. Au Chapus et au passage de l'Ouest, la surface libre est au dessus sur toute la période d'observation alors que le modèle a du mal à reproduire une marée basse convenable lors du passage morte-eau/vive-eau au niveau de la fosse d'Enet et du plateau d'Angoulin.

Marée haute : La phase de marée haute est mieux représentée avec des écarts moins flagrants que la marée basse. On soulignera une surestimation de la marée haute sur la période de déchet.

Le cas particulier de la pointe de Gatseau se dégage avec une bonne représentation en amplitude de la marée, mais un décalage général au niveau de la phase avec un signal de marée modélisé en avance sur celui observé.

Vitesses

La capacité du modèle à reproduire les intensités et les directions des vitesses de courant est estimée. Les points sont divisés selon leur situation géographique : situés dans la baie de marennes-Oléron et situés à l'extérieur.

Pertuis : Les passages de l'est et ouest qui entourent fort Boyard présentent les mêmes caractéristiques au niveau des résultats de vitesses. Les vitesses en U et V sont sous évaluées par le modèle au niveau des intensités, mais répondent bien aux changements de directions des courants. Au Chapus, la vitesse en U est très faible et le modèle n'arrive pas à représenter un petit pic de vitesse observé à marée basse ; en V les vitesses qui sont observées au montant ne sont pas représentées par le modèle. Le plateau d'Angoulin donne de bonnes correspondances sur U et V.

Bassin de marennes-Oléron : Le modèle sous estime les intensités de vitesses à la marée basse au niveau de la fosse d'Enet tandis qu'il les surestime en marée haute sur V. Sur U les vitesses sont très petites et la simulation ne reproduit pas le modèle observé. Le chenal Est du banc de Lamoureux surestime lui aussi les vitesses en U tandis qu'il les sous-estime en V pendant le montant et le descendant. Le passage de l'Ouest quand à lui montre une bonne correspondance en U et une sous estimation en V.

Les résultats avec le modèle 3D sont sujets à discussions. Le premier constat est que le modèle n'arrive pas à reproduire correctement le signal de marée à tous les points de mesures. La différence est plus nette lors de la marée basse avec des écarts importants, mais la marée haute est elle aussi mal reproduite. Ces erreurs influencent directement les directions et les intensités des vitesses modélisées. Lorsque les vitesses sont trop fortes, le modèle n'arrive pas à reproduire les intensités de courant correctement. Contrairement au modèle 2D, les écarts ne sont pas localisés géographiquement mais se répercutent sur l'ensemble des points d'observations.

L'apport de la modélisation 3D dans l'étude d'une région hydrodynamique apporte une nouvelle dimension à la connaissance des profils de courants sur la colonne d'eau. L'importance de la bathymétrie et des frottements sur le fond est mise en avant. Les conditions de forçages et la bathymétrie inchangés n'explique pas ce phénomène. La principale raison avancée est le coefficient de frottement utilisé dans le modèle 3D. La qualité de la bathymétrie a été prouvée ainsi que les données des capteurs ADCP. En revanche la rugosité du fond devient un point important, les vitesses n'étant plus moyennées sur la verticale lors du calcul. Le frottement de type Chézy est utilisé en modélisation 2D, en étant uniforme sur le domaine, pour estimer la rugosité du fond en moyennant la vitesse de l'écoulement sur la verticale. Le type de frottement uniforme ou par zones montre ses limites

dans un modèle tridimensionnel. Le recours à une carte de la nature des fonds précise, avec un coefficient de rugosité propre à chaque type de fond, est une approche à considérer.

Annexe C

Publication scientifique

CALIBRATION OF COASTAL TIDE MODELS
BY SATELLITE IMAGERY

J. Chalumeau¹, M. Karpytchev^{1*}, and F. Pouget¹

Continental Shelf Research, submitted

ABSTRACT

Fast growing dataset of high-resolution satellite images provides an opportunity for adjusting numerical models in shallow coastal waters through direct comparison of observed and modeled sea-land boundaries called waterlines. We employ this approach for fitting a 2D high-resolution tidal model based on TELEMAC software to a set of waterlines derived from LANDSAT 7 and SPOT images over the Marennes Oleron Bay (MOB) situated inside the Pertuis Charentais in the NE Bay of Biscay, in France. This study was principally motivated by the needs for accurate estimation of the time interval during which the tidal flats in the MOB are emerged. The tidal flats emersion time during daylight hours is a key component in the coastal ecological systems modeling. We demonstrate that the waterline images can be efficiently combined with tide gauge measurements in order to reduce the phase errors in predictions of tidal elevations along the low slope coasts. Numerical models with spatially variable bed friction coefficient inside the Pertuis Charentais appeared to match better both the observed waterlines and the tide gauges measurements.

Key words: Tidal flat, satellite imagery, bottom friction

1. Introduction

Over the last decade, intensive development of user-friendly numerical software made the 2D modelling of tides easily accessible to a broad community of interdisciplinary ocean studies (Hervouet, 2007, Hearn, 2008, Sheng et al., 2012, and references therein). A common use of 2D tide models is to solve the shallow-water equations for variations of sea level and vertically integrated currents and to calibrate model parameters by comparing predicted variables to available sea level records and current measurements. This approach was proven to be successful in predicting amplitudes and phases of principal tidal constituents both globally (e.g. Lyard et al, 2006; Westerink et al, 1994) and regionally (Fortunato, 1999; Jones, et al., 2009; Sheng et al, 2012) with the accuracy being dependent on the quality of bathymetric data, parameterization of sea bed friction, turbulent diffusivity and adequacy of meteorological and open boundary forcing. However, numerical models in the framework of interdisciplinary studies can focus on evaluating some specific model parameters and place new constraints on accuracy of numerical modelling. Such situation occurs in modelling coastal ecosystems in the Marennes-Oleron Bay (MOB), NE Bay of Biscay (fig.1) for which the incident solar radiation is to be precisely estimated. The intertidal flats represent about 60 % of the total MOB surface area (Bassoullet et al., 2000), the tide range inside the Bay reaches 6 m during spring tides and, by consequence, the rhythm of the tidal flat emergence-immersion cycles controls the amount of sunlight energy available for the benthic primary production (Guarini et al., 1997). A 2D tide model is an adequate tool for predicting the water extent on intertidal flats and the periods of their exposure by estimating location of the sea-land boundary called waterline. A number of studies have already simulated tide propagation in the Pertuis Charentais (fig.1) with a special focus on circulation and sediment transport in the MOB (Le Hir, 2000 ; Bacher et al, 2000 ; Freissinet et al, 2001, Bertin, 2005; Struski, 2006 ; Stanisière et al, 2006 ; Macur,1999; Guizien, 2013). However, all the studies used sea surface elevations and currents measured at isolated points during short-term field campaigns (days to weeks) as there are only two permanent tidal stations in the region: La Pallice and Chapus (fig.1). By consequence, locating the waterline along the whole tidal flat in a model constrained just by a few short-period measurements can be not accurate enough because the waterline dynamics is directly controlled by variations of the intertidal flat topography which is (1) prone to rapid changes (Bertin et al.,2005) and (2) distorts the emergence-immersion cycles locally due to tidal asymmetries (Le Hir, 2000). A dense network of permanent tide gauges within the MOB might be necessary for accurate monitoring of the waterline dynamics. Another way of observing the waterline is suggested by satellite imagery. Mapping the extent of water bodies from remotely sensed images was successfully developed since 70s after the launch of Landsat, SPOT and other satellites providing multispectral images of the Earth's surface. Various techniques for delineation of waterlines from satellite images, generally known as waterline method (Koopmans & Wang, 1995, Masson et al, 1995), were elaborated for mapping flooded areas (Bates and De Roo, 2000, Mason et al., 2009), constructing digital elevation models of intertidal flats (Mason, 1995), measuring sediment transport (Mason et al., 1999, Mason and Garg, 2001; Lafon et al., 2001), surveying morphological changes (Ryu et al, 2008) and coastline evolution (White and ElAsmar, 1999, Chen and Chang, 2009) as well as for many other diverse applications (Cracknell, 1999).

Detecting waterlines on mudflats can be effectively performed by using infrared bands of satellite imagery (Ryu, 2002), Ryu (2008), Murray (2012). The spatial resolution of freely available Landsat Thematic Mapper (TM) data is 30 m in the infrared bands (ref). Since the average slope of the BMO mudflats is about 1:1000 (Leguerrier et al., 2004) this means that a model matching perfectly an observed waterline achieves a 3 cm accuracy in modeling sea surface elevation in the proximity of the waterline. In a sense, the waterline may be considered as a “spatial tide gauge”: while an ordinary tide gauge provides a continuous record at a particular point, waterline location yields spatial variation of sea level at a specific moment in time. Exploring the efficiency of constraining coastal tide model via the locations of satellite-derived of waterlines was a principal goal of this study. This paper presents the experiments with a 2D tide model constrained previously by tide gauge records within the Pertuis Charentais (Nicolle, 2006, Chalumeau, 2013). Apart from the practical importance of timing the exposure periods of intertidal flats for ecosystem modelling, it is also of interest to understand how sensitive the waterline location is to the magnitude of the sea bed friction coefficient. The paper is organized as follows: the studied area and the method used for delineating the waterlines are described in section 2, the numerical 2D tide model is presented in section 3, the results are assembled in section 4 and discussed in section 5 followed by the conclusions in section 6.

2. The Pertuis Charentais

2.1 Geographical Setting

The Pertuis Charentais are two semi-enclosed embayments located off the Atlantic coast of France and separated from the Bay of Biscay by Re island and by Oleron island (fig.1). Both embayments are shallow basins of about 30 km long and 10 km wide with a deeper western part where sea depth is of about 40-50 m. The shallow eastern part of the Pertuis is only of about 5 m deep on average and large intertidal mudflats border the Marennes-Oleron Bay (MOB) and the eastern coast of the Pertuis Breton. The Marennes-Oleron Bay is of particular economic and ecological importance because it is one of the leading sites in shellfish farming and oyster production in Europe. The MOB is a 150 km² macro-tidal bay dominated by semi-diurnal tide with tidal range of up to 6 m. Wide intertidal mudflats represent 60% of the total surface area of the Bay (Gouleau et al., 2000). The mean slope of mudflats is about 1/800 – 1/1000 that is consistent with the tidal range of 5-6 m (Le Hir et al., 2000). The topography of the flatter section (slope ~ 1/1400) in the middle of the intertidal flat is characterized by a system of ridges and runnels (Le Hir, 2000). Two small rivers bring fresh water into Marennes-Oleron Bay: the Charente with flow rate ranged from 10 to 400 m³s⁻¹ and the Seudre with a 1-40 m³s⁻¹ discharge. Although the impact of both rivers on the water quality in the MOB can be significant, they have little effect on tidal currents in the Pertuis. There is a much larger estuary southward from the Pertuis Charentais: it is the Gironde with a mean outflow of 1,440 m³s⁻¹ during winter. However, its impact on hydrodynamics of the Pertuis Charentais is negligible, although the chemical signals of the Gironde waters are traced inside the Pertuis Charentais (Boutier et al., 2000).

2.2 Tide gauge data

With the spring tides range up to 6 m, the Pertuis Charentais are classified as a macro-tidal region. As in the rest of the Bay of Biscay (Pairaud et al., 2008), the tides are dominated by the semi-diurnal constituents M2, S2, N2. Table 1 summarizes amplitudes and phases of principal constituents calculated by T-tide software (Pawlowicz et al., 2002) from sea level records at 6 tidal stations shown in fig. 1 (Chalumeau, 2013). All the constituents increase towards the inner closed part of both embayments due to geometrical distortion and sea bed friction (Le Blond, 1991, Blanton et al, 2002) and enhance the overtides M4 and M6 inside Pertuis Charentais (Nicolle and Karpytchev, 2007). For example, the M2 constituent is amplified by 25 cm between Sables d'Olonnes, La Cotinière and Aix Island.

2.3 Satellite images and waterline extraction

Usually, the water boundaries are delineated from infrared bands of satellite imagery (Frazer and Page, 2000) because the strong absorption of infrared electromagnetic waves by water molecules enhances the contrast between water body and land. A choice of an appropriate spectral band for waterline detection depends on the type of coastal environment under consideration (Phinn et al., 2000). Various approaches (Frouin et al., 1996) demonstrated that both the mid-infrared (1.55 – 1.75 μm) and near-infrared images (0.76-0.90 μm) are suitable for waterline extraction on mud flats under flood tides. On the ebb tide, however, the discrepancies between the images can occur (Ryu et al., 2002): the mid-infrared band is more sensitive to the water remaining in patches of exposed tidal flat while, on the other hand, the near-infrared is more affected by the turbidity of ebb tide water. Chalumeau (2013) collected ten Landsat 7 TM and four SPOT images corresponding to the days of “pure tide” in the BMO, i.e. to the days with no wind or storm surges observed. The waterlines were delineated by the maximum likelihood classification programmed in ArcGIS (<http://resources.arcgis.com>) by using 10 “water-land” training areas. The results from both the near-infrared and mid-infrared bands were coherent. Three mid-infrared images from the study of Chalumeau (2013) are used in this paper: two Landsat 7 TM images from band 5 (1.55 – 1.75 μm) acquired in 2001 and corresponding to flood and ebb tides and one SPOT image of ebb tide taken in 1994 from band 4 (1.58 – 1.75 μm).

3. Model Set-Up

From the oceanographic point of view, the Pertuis Charentais are shallow and well mixed macro-tidal basins and tidal elevations can be accurately evaluated by using the depth-averaged shallow-water equations (Hervouet, 2007):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(H\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla\mathbf{u} + f\mathbf{z} \times \mathbf{u} = -g\nabla\eta - \frac{2g|\mathbf{u}|\mathbf{u}}{HC} + \nu\Delta\mathbf{u} \quad (2)$$

where $\mathbf{u}=(u, v)$ is the vertically averaged velocity, η is the sea surface elevation, H is the total depth, f is the Coriolis parameter, g is the gravity acceleration, ν is eddy diffusivity held constant in all numerical simulations: $\nu = 0.1 \text{ m}^2/\text{sec}$ (Bowden et al., 1975; Ezer and Mellor, 2000), C is the Chezy friction coefficient. The sea bed friction stress, τ_b , is given by a quadratic relationship:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_d |\mathbf{u}| \mathbf{u} \quad (3)$$

where ρ is the water density and C_d is a dimensionless drag coefficient. This drag coefficient is expressed by the Chezy coefficient as follows:

$$C_d = \frac{2g}{C^2} \quad (4)$$

Shallow water equations (1)-(2) were solved by TELEMAC 2D software based on the finite-element method (Hervouet, 2007). A grid of triangular elements (fig.2) extends from the Gironde estuary to the North coast of the Bay of Biscay in order to set an offshore open boundary far away from the Pertuis Charentais. Different grids were used to find an optimal one (fig.2) that is composed of 45117 elements of variable size ranging from 3 km near the open boundary to less than 50 m inside the MOB. The tidal model was driven by specifying at the open boundary the elevations of 16 constituents taken from the global tidal model FES-2010 (Lyard et al., 2006): M2, S2, N2, M4, K2, MN4, MS4, O1, NU2, 2N2, MU2, K1, M6, L2, 2MS6, T2. The freshwater river discharges were set to their monthly averaged values (Nicolle, 2006).

3.2 Bathymetry

The model bathymetry was assembled from several datasets. First, a digital elevation model (DEM) of French Navy Hydrographic Office (SHOM) was used to map the entire model domain in fig.2. This dataset has a 50 m horizontal resolution and a 30 cm uncertainty in elevation. Then, another dataset (Departmental Direction of Equipment, pers. comm.) containing sea depths measured between 1994 and 2003 in areas of rapid morphological sea bed changes (Breilh et al., 2013) was included to update the DEM of SHOM. Finally, the most accurate sea bed elevations were supplied by a high-resolution (5x5 m) LiDAR (Light Detection and Ranging) dataset constructed by IGN (ref) for the Program Litto3D (ref) in 2010. The LiDAR dataset enabled to map intertidal flats in the MOB with a horizontal resolution ranging from 10 to 50 m (fig.2).

4. RESULTS

4.1 Calibrating the model by tide gauge measurements

First, we calibrated the model by assuming the Chezy coefficient in eq. (2) to be spatially uniform within the entire model domain (fig.2). The model runs differed only in the magnitude of the Chezy coefficient that was set consecutively to different values ranging from

50 to $120 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$. This range corresponds to the drag coefficient (C_d) decreasing from 0.008 to 0.0014. All numerical simulations were carried out on a period of 1 year. In the paper, we limit ourselves to discussing the amplitudes and phases of the dominant semi-diurnal constituent M2 and its overtide M4. This is done for several reasons: (1) the diurnal constituents were rather insensitive to variations of bottom friction coefficient, (2) the other semi-diurnal constituents respond to changes of Chezy coefficient similarly to M2, (3) M6 is relatively small in the region of interest and the quality of available sea level records does not permit its accurate harmonic analysis (4) the relationships between M2 and M4 control the sense and amplitude of tidal asymmetry in the Pertuis Charentais (Friedrichs and Aubrey 1988, Le Hir, 2000) and, finally, it was noted in previous numerical experiments (Nicolle and Karpytchev, 2007, Chalumeau, 2013) that model's ability to reproduce M2 and M4 in the Pertuis Charentais is a reliable indicator of the overall model skill.

Fig. 3 summarizes the impact of friction coefficient on the amplitudes and phases of M2 and M4 that were evaluated by T_tide software (Pawlowicz et al., 2002) at 6 tidal stations shown in fig.1. The amplitude of M2 is rather insensitive to magnitude of the Chézy coefficient in the range 50 to $100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$, the amplification of M2 inside the Pertuis Charentais, especially at La Pallice and Aix, being controlled primarily by coastline geometry and sea depth variations (Le Blond, 1991). On the other hand, the M2 phases at the tidal stations inside the Pertuis Charentais, i.e. at La Pallice, Aix and Chapus react noticeably to changes of the Chezy coefficient (fig.3b) and a best fit to the observed phases of M2 requires $C = 50 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ at La Pallice and Aix and a slightly larger value ($C = 60 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$) is favoured by matching the M2 phase at Chapus. Similar tendencies were found in comparing modelled and observed amplitudes and phases of M4 constituent. At the stations outside the Pertuis Charentais (Sables d'Olonne, Baleineaux and Cotinière), amplitude and phase of M4 do not change much when the Chezy coefficient is modified in the model. The M4 amplitude (fig.3c) inside the Pertuis Charentais, at Aix, Pallice and Chapus is closer to the observations when $C > 100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ while the phases of M4 are better predicted at Aix, Pallice and Baleinaux with the Chezy coefficient between 50 and $75 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$. Thus, there is slight but noticeable discrepancy between the Chezy coefficients required by matching the observed M4 amplitudes and those needed to match the M4 phases.

4.2 Calibrating the model by waterline locations

We used two LANDSAT and one SPOT images of the BMO to compare observed and modelled waterlines (fig 4). Fig. 4a displays the waterline position during the rising tide, in flood, on May 5th, 2001, and fig. 4b-4c present the waterlines of the descending tide, in ebb, on July, 21th, 2000 and on July 14th, 1994. The on-flood waterline in fig.4a looks smoother than waterline descending the flat on ebb tide (fig.4 b-c) due to water staying in the tidal flat ripples, runnels and mud patches (Ryu, 2002). The tides at all three images are of the similar range of about 4 m. Three modelled waterlines in fig. 4 correspond to magnitudes of Chezy coefficient: 50, 75 and $100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$, respectively. The modelled waterlines are quite close to the observed ones everywhere except off the eastern coast of the BMO where the mid-intertidal zone is the flattest. By this reason, only the waterlines on the eastern tidal flat were analyzed for the model calibration. All waterlines predicted by the uniform friction model, in

the range $50 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1} < C < 100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$, lag behind the observed waterlines. In other words, the modelled waterlines arrived to the location of the observed ones some minutes later. To estimate these delays, we searched a moment at which the modelled waterline reached the location of the observed one (fig.5). Note that the overall shape of the modelled waterlines along the tidal flat is close to that of the observed waterline. The time-lag between the observed and modelled waterlines depends on the friction coefficient and equals to 25, 10 and 5 min for the Chezy coefficient 50, 75, and $100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$, respectively. The best fit to the observed waterline was obtained with the spatially uniform friction model for the Chezy coefficient equal to $100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$. In this case, the modelled waterlines lag behind the observed ones by approximately 5 min. Fig.5 overlays the delayed waterlines (i.e. waterlines locations predicted 5, 10 or 25 min after the image acquisition time) on the observed ones. The matching is not perfect but it is the small horizontal scale structures that dominate the misfit between the observed and predicted waterlines when regarded at the scale of the whole Bay. These small scale discrepancies are due mostly to local perturbations in topography of intertidal zone that occurred between the image acquisition time (1994, 2000, and 2001) and the time of LiDAR measurements (2010). Indeed, the tidal flat topography is known to be prone to constant changes (Bertin, 2005) and in order to illustrate it we modelled the waterline extracted from the SPOT image acquired in 1994 (fig.5b) and the 2001-year Landsat image (fig.5c). Both images were taken on the similar ebb tide but the distance between the modelled and observed waterlines in the middle of the flat is noticeably larger in 1994 than in 2001 because of plausible accretion in this part of the intertidal zone (Le Hir, 2000).

4.3 A model with spatially variable friction coefficient

Adjusting the model by the waterline locations in the BMO indicates a somewhat smaller frictional coupling between sea bed and tidal flow (i.e. larger Chezy coefficient) than when the model is compared to tidal constituents measured at gauges in and around the Pertuis Charentais. Following Nicolle and Karpytchev (2007), we supposed that the observed discrepancy is a manifestation of spatial variability in effective sea bed roughness between the BMO and the rest of the basin. Indeed, the relatively smooth topography of the BMO mudflats is in noticeable contrast to the rest of sea bottom in the Pertuis Charentais that is covered by numerous banks, dunes and channels. To investigate the consequences of the spatially variable friction, we divided the Pertuis Charentais in two zones with different Chezy coefficients (fig. 6). The model was then run with various combinations of the Chezy coefficients ranged from 20 to $120 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$. It turned out that the best fit to the waterlines together with the tidal constituents (Table 1) was obtained by the model with the Chezy coefficient set on the tidal flats to $100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ and to $70\text{-}75 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ in the rest of the model domain (fig.2). Location of the waterlines predicted by the model with the frictional contrast 75/100 is shown in fig.7. The modelled waterlines pass as closely to the observed ones as the waterlines predicted by the model with the spatially uniform Chezy coefficient equal to $100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ (fig.4). On the other hand, the frictional contrast model yields better predictions of the M2 phases (fig.8) and of the M4 amplitudes. As to the model skill in predicting the M4 phase, it is not perfect but comparable to this obtained by the model with spatially uniform friction.

5. Discussion.

The waterline method is widely used since 1990s (Mason et al., 1995) but its application to constraining bottom friction coefficient on tidal flats was seemingly not yet developed in details (though, for a river-induced inundation model, a thorough calibration of friction coefficient was performed by Mason et al. (2009)). A common usage is to employ an already calibrated tide model for predictions of water elevations at the waterline (Wang and Koopmans 1996, Mason et al., 1999) in order to construct DEM or to estimate the sediment transport. In this study, we were mostly interested in accurate timing of the waterlines dynamics. It turned out, that the misfit in predicting the waterline locations by 2D model with spatially uniform friction coefficient can be as large as nearly half an hour per tidal cycle. This can lead to significant errors in estimating the emergence-immersion periods of inter-tidal zones. By consequence, the 2D tide models for the regions with broad tidal flats should be used with care unless measurements of water elevations on the tidal flats are not carried out. Installing a tide gauge directly in the inter-tidal zone would supply necessary constraints on the model parameters provided that the waterline moves coherently along the whole tidal flat. If, nevertheless, the bathymetry data used in the model differs significantly from the real tidal flat topography (because of rapid accretion/erosion, for example), then calibrating the model by a point water elevation time-series can be misleading for estimations of the whole emerged area of tidal flats. The use of satellite images can be particularly effective, in this case, for assessing the quality of bathymetry data and monitoring tidal flat evolution over decades. Another important practical point is that setting up a tide gauge on mud flats is not easy and sometimes impossible. On the other hand, the collection of satellite images is growing up steadily and the accuracy of waterlines location is improving.

We saw above that the predicted waterlines follow closely the observed ones (with time lag less than 5 min) if the Chezy coefficient is set to $100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ ($C_d = 0.002$) everywhere in the model domain or at least, on the tidal flats (fig.6) but in this case $C = 75 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ in the rest of the Pertuis Charentais. In contrast, the best fitting of harmonic constituents measured at tidal stations (fig.1) requires a somewhat smaller Chezy coefficient (i.e. a larger C_d). A similar conclusion was drawn by Nicolle and Karpytchev (2007) who found that a model with the friction contrast $C = 60 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ on tidal flats and $C = 100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ elsewhere improves predictions of relative amplitude M4/M2 and phase $2M_2 - M_4$ in the Pertuis Breton (fig.1). Spatial variability of bottom friction coefficient can originate from variations of sea bed roughness induced by grain size or form drag variability (Ganju and Sherwood, 2010; Passeri et al, 2013), or by vegetation and benthic organisms (Seifert et al., 2009). It was implemented a number of models (Lardner et al., 1993; Cheviet, 2003; Villaret et al., 2010; Lu and Zhang, 2006 and ref. therein) but the impact of spatial variability in the bottom friction coefficient is often hardly noticeable in available sea level and current measurements (Lopes and Dias, 2007; Ganju and Sherwood, 2010). It is worth noting that other physical mechanisms can result in apparent variability of the bottom friction coefficient such as density stratification effects (Giese and Jay, 1989; Souza and Simpson, 1996; Friedrichs and Wright, 1997; Pavel et al, 2103). The interactions with wind and waves can significant modify the sea bed stresses

(Sheng and Wang; 2004; Xing et al., 2012; Chini and Stansby, 2012). The wind-induced waves can significantly enhance the bottom friction coefficient through interactions of wave-induced orbital velocities with tidal currents (Grant and Madsen, 1979; Christoffersen and Jonsson, 1985). The non-linear interaction in the bottom boundary layer affect profoundly the storm surge propagation in shallow coastal regions (Davies and Lawrence, 1995; Jones and Davies, 1998; Brown and Wolf, 2009, Nicolle et al., 2009; Bertin et al., 2012). These and other stratification effects can be taken into account in a 3D model, but detailed current, wave and bottom stress measurements are needed to distinguish between the various processes that control the waterline dynamics in the BMO.

6. Conclusions

In this paper, we extracted the waterline positions in the Bay Marennes-Oléron from satellite images (LandSAT and SPOT) and compared them with the predictions of a numerical tidal model. Employing LiDAR topographic data in the model had reduced uncertainties in the bathymetry and allowed to reproduce closely the shape of the observed waterlines. The models with a spatially uniform bottom friction coefficient result in a time lag between the observed and modelled waterlines depending on the Chezy coefficient. Thus, the modelled waterline lags behind the observed one by 25 min if the Chezy coefficient equal to $50 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ and by 5 min with $C = 100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$. On the other hand, setting $C = 100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ everywhere in the model domain results in an over amplification of the tidal constituents in the Pertuis Charentais. A spatially variable friction coefficient with the Chezy coefficient set to $100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ on the tidal flats of the BMO and to $75 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$ in the rest of the Pertuis Charentais provides an optimal solution. The frictional contrast model with the spatially variable Chezy coefficient ($75/100 \text{ m}^{0.5} \text{ sec}^{-1}$) matches successfully the observed waterline locations during both flood and ebb tide and reduces the phase errors in the predicted tidal constituents. By consequence, it allows an accurate estimate of the emersion-immersion periods during which the tidal flats in the BMO are exposed to the solar radiation. Calibrating tidal models by the waterline method should be considered as a complementary technique to classical approach of fitting sea surface elevations by tuning the model parameters. Whereas the tide gauge records provide continuous records at (usually rare) grid of points, the waterline positions constrain the sea level variations in space at discrete instants of time. This can be very useful for assessing the quality of bathymetry dataset and for monitoring the evolution of intertidal zones over decadal periods.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank A. Nicolle for help in setting up a numerical model, N. Lachausse and P. Tiphaneau for participation in tide gauge installations, SHOM, DDE 17, SONEL for tide records and bathymetry data, IGN for the LiDAR dataset. This work was partially supported by Conseil General de Charente-Maritime (PhD fellowship to J.C.).

REFERENCES

- Bacher, C., Sochard, S., Freissinet, C. ; Sauvaget, P., 2000, Vers une modelisation operationelle pour l'amenagement des zones cotieres : l'exemple du bassin de Marennes-Oleron (France). *La Houille Blanche* 7/8, 66-73
- Bates, P.D., De Roo, A.P.J., 2000, Simple raster-based model for flood inundation simulation, 236, 54-77
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., Robert, S., 2000, Sediment transport over an intertidal mudflat : field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Mrennes-Oleron" (france), v.20, 1635-1653
- Blanton, J.O., Lin, G., Elston, S.A., 2002, Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks, *Continental Shelf Research*, 22, 1731-1743
- Bertin X., Chaumillon E., Sottolichio, A. and Pedreros, R., 2005. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: The Marennes-Oléron Bay and Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research* 25, 115-1131
- Bertin, X. et al., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, 42(0), p.16-30
- Boutier, B., Chiffolleau, J.-F., Gonzalez, J.-L., Lazure, P., Auger, D., Truquet, I., 2000. Influence of the Gironde estuary outputs on cadmium concentrations in the waters: consequences on the Marennes-Oléron bay (France). *Ocean. Acta* 23, 745–757.
- Bowden, K.F., Krauel, D.P. & Lewis, R.E., 1975. Some Features of Turbulent Diffusion from a Continuous Source at Sea. In *Turbulent Diffusion in Environmental Pollution, Proceedings of a Symposium held at Charlottesville*. Elsevier, p. 315-329.
- Breilh, J.F., Chaumillon, E., Bertin, X., Gravelle, M., Assessment of static flood modeling techniques: application to contrasting marshes flooded during Xynthia (western France), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1595-1612
- Brown, J., Wolf, J., 2009, Coupled wave and surge modeling for the Eastern Irish Sea and implication for model wind-stress. *Continental Shelf Research*, 29, 1329-1342
- Chalumeau, 2013. Hydrodynamic modeling of jelly fish transport in coastal environment : the case study of the, PhD Thesis, University of La Rochelle (France)
- Chen, W.-W. & Chang, H.-K., 2009. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(1), p.54-60
- Cheviet, C. 2003, Identification ed parametres dans les equations de Saint-Venant,

L'hydraulique numerique, Revue europeenne des elements finis, v. 12, n2-3, pp. 157-170

Chini, N., Stansby, P.K. 2012. Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise. *Coastal Engineering*, 65, 27-37.

Christoffersen J.B, Johnsson, IG., 1985, Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion, *Ocean Engineering*, 12, 387-423

Cracknell, A.P., 1999, Remote sensing techniques in estuarine and coastal zone- an update. *International Journal of remote Sensing*, 19(3), 485-496

Davies, A.M, Lawrence, J., 1995, Modeling the effect of wave-current interaction on the three-dimensional wind-driven circulation of the eastern Irish Sea, *J. Phys Oceanography*, 25,29-45

Ezer, T. & Mellor, G.L., 2000. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 32(3-4), p.185-208

Freissinet, C., Sauvaget, P. & Bacher, C., 2001. Modélisation opérationnelle pour la gestion intégrée des zones côtières : application à la baie de Marennes-Oléron. *Journal de Recherche Oceanographique* 26, 105

Frazer, P.S., Page, K.J., 2000, Water body detection and delineation with Landsat TM data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v.66, n.12, 1461-1467

Fortunato, A.B., Oliveira, A., Baptista, A.M., 1999, On the effect of tidal falts on the hydrodynamics of the Tagus estuary, *Oceanologica Acta*, 22, 31-44.

Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G. 1988, Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27, 521-5545

Friedrichs, C.T., Wright, L.D., 1997, sensitivity of bottom stress and bottom roughness estimates t density stratification, Eckernforde Bay, southern Baltic Sea. *Journal of Geophysical Research*, 102, 5721-5732

Frouin, R., Schwindling, M., Deschamps, P.Y. , 1996, Spectral reflectance of sea foam in the visible and near-infrared: in situ measurements and remote sensing implications, *Journal of Geophysical Research*, 1010, 14361-14371

Giese, B.S, Jay, D.A., 1989. Modeling tidal energetic of the Columbia River estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 29, 549-571

Ganju, N.K., Sherwood, C.,R., 2010, Effect of roughness formulation on the performance of a coupled wave, hydrodynamic, and sediment transport model, 33, 299-313

Gouleau, D. et al., 2000. Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-Oleron Bay (France). *Continental Shelf Research*, 20(12-13), p.1513-1530

Grant W.D., Madsen, O.S., 1979, Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, 84, 1797-1808

Guizien, K., Dupuy, C., Ory, P., Montanié, H., Hartmann, H., Chatelain, M., Karpytchev, M., Microorganism dynamics during a rising tide : Disentangling effects of resuspension and mixing with offshore waters above an intertidal flat, *Journal of Marine Systems*, in press

Guarini, J.-M., Blanchard, G.F., Gros, P., Harrison, S.J., 1997, Modelling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity, *Marine Ecology Progress Series*, v.153, 25-36

Hearn, C.J., 2008, *The dynamics of coastal models*, Cambridge Univ. Press, 488 pp.

Hervouet, J.M., 2007. *Hydrodynamics of free surface flows*. Wiley-Blackwell, 360 pp.

Jones, J.E., Hall, P., Davies, A.M., 2009, An inter-comparison of tidal solutions computed with a range

of unstructured grid models of the Irish and Celtic Sea Regions, *Ocean Dynamics*, 59(6) , 337-363

Jones J.E., Davies., A.M., 1998, Storm surge computations for the Irish Sea using a three-dimensional numerical model including wave-current interaction, *Continental Shelf Research*, 18, 201-251

Koopmans, B. N. & Wang, Y. 1995. Measurement of land-sea transition from ERS-1 SAR at different phases of tidal water. *Netherlands Remote Sensing Board Report* 95–20, 64.

Lafon V, Froidefond JM, Lahet F, Castaing P (2001) SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, pp. 136-148

Lardner, R.W, Al-Rabeh, A.H., Gunay, N., 1993, Optimal estimation of parameters for a two-dimensional hydrodynamical model of the Arabian Gulf, *Journal of Geophysical Research*, 83, 4717-4721

Le Blond, P.H., 1991, Tides and their interactions with other oceanographic phenomena in shallow water (review), *Tidal Hydrodynamics*, ed. B.B. Parker, J. Wiley, 912 pp.

Le Hir, P. et al., 2000. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 20(12-13), p.1433-1459

Leguerrier, D., Niquil, N., Petiau, A., Bodoy, A. 2004. Modeling the impact of oyster culture on a mudflat food web in Marennes-Oleron Bay (France). *Marine Ecology Progress Series*, 273, p.147-161.

Lopes, J.F, Dias, J.M., 2007, Residual circulation and sediment distribution in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Journal of Marine Systems*, 68, 507-528.

- Lu, X., Zhang, J., 2006, Numerical study on spatially varying bottom friction coefficient of a 2D tidal model with adjoint method. *Continental Shelf Research*, 26, 1905-1923
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006, Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.
- Macur, O., 1999. *Etude des courants de marée dans les pertuis charentais*, Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine.
- Mason D.C., Davenport I.J., Robinson G.J. (1995) Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'water-line' method. *Geophysical Research Letters*, vol. 22, no 23, pp. 3187-3190
- Mason, D.C. et al., 1999. Measurement of Recent Intertidal Sediment Transport in Morecambe Bay using the Waterline Method. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(3), p.427-456
- Mason, D.C., Bates, P.D. , Dall' Amico, J.T., 2009. Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels. *Journal of Hydrology*, 368(1-4), p.224-236
- Mason, D.C. & Garg, P.K., 2001. Morphodynamic Modelling of Intertidal Sediment Transport in Morecambe Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(1), p.79-92
- Mason, D.C., Scott, T.R. & Dance, S.L., 2010. Remote sensing of intertidal morphological change in Morecambe Bay, U.K., between 1991 and 2007. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(3), p.487-496
- Murray N.J., Phinn, S.R., Clemens, R.S, Roelfsema, C.M., Fuller, R.A., 2012, Continental Scale Mapping of Tidal Flats across East Asia Using the Landsat Archive, *Remote Sensing*, 4, 3417-3426
- Nicolle, A. 2006, Modeling tides and storm surges in the Pertuis Charentais, PhD Thesis, University of La Rochelle, 307 pp.
- Nicolle, A. & Karpytchev, M., 2007. Evidence for spatially variable friction from tidal amplification and asymmetry in the Pertuis Breton (France). *Continental Shelf Research*, 27(18), p.2346-2356
- Nicolle, A., Karpytchev, M. & Benoit, M., 2009. Amplification of the storm surges in shallow waters of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*, 59(6), p.921-935
- Pairaud, I.L., Lyard, F., Letellier, T., Marsaleix, P., 2008, Dynamics of the semi-diurnal and quarter-diurnal internal tides I the Bay of Biscay 1: barotropic tides, *Continental Shelf Research*, 28, 1294-1315
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), p.929-937

- Passeri, D., Hagen, S.C, Smar, D., Alimohammadi, N., Risner, A., White, R., 2012, Sensitivity of an ADCIRC tide and storm surge model to Manning's N, Estuarine and Coastal Modeling, Proc. XII Intern. Conference, ASCE
- Pavel, V., Raubenheimer, B., Elgar, S., 2013, Processes controlling stratification on the northern Skagit Bay tidal flats. *Continental Shelf Research*, 60S, S30-S39
- Phinn, S.R. et al., 2000. Optimizing Remotely Sensed Solutions for Monitoring, Modeling, and Managing Coastal Environments. *Remote Sensing of Environment*, 73(2), p.117-132
- Ryu, J.-H., Won, J.-S. & Min, K.D., 2002. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of Environment*, 83(3), p.442-456
- Ryu, J.-H., Kim, C.-H., Lee, Y.-K., Won, J.-S., Chun, S.-S., Lee, S., 2008, Detecting the intertidal morphologic change using satellite data, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78, 623-632
- Seifert, T., Fennel, W., Kuhrt, C., 2009. High resolution model studies of transport of sedimentary material in the south-western Baltic. *Journal of Marine Systems*, 75, 382-396
- Sheng J., Wang L., 2004, Numerical study of tidal circulation and non linear dynamics in Lunenburg Bay, Nova Scotia, *J. Geoph. Res.*, 109, C10018
- Sheng Y.P., Davis, J.R., Figueiredo, R., Liu, B., Liu, H., Luettich, R., Paramygin, V.A., Weaver, R., Weisberg, R., Xie, L., Zheng, L. 2012, A regional testbed for storm surge and coastal inundation models – an overview, *Estuarine and Coastal Modeling, Proc. XII Intern. Conference, ASCE*
- Souza, A.J., Simpson, J.H., 1996. The modification of tidal ellipses by stratification in the Rhine ROFI. *Continental Shelf Research*, 16(8), 997-1009
- Stanisière, J.-Y., Dumas, F., Plus, M., Maurer, D., Robert, S., 2006 Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oleron, IFREMER (PNEC)
- Struski, C., Bacher, C., 2006, Preliminary estimate of primary production by phytoplankton in Marennes-Oleron Bay, France, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(1-2), 323-324
- White, K. & El Asmar, H.M., 1999. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta. *Geomorphology*, 29(1-2), p.93-105
- Villaret, C., Hervouet, J.M., Huybrechts, N., Van, L.A., Davies, A.G., 2010, Effect of bed friction on morphodynamic modeling: application to the central part of the Gironde estuary, in *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2009*, Vionnet et al., (eds), pp.899-905

Westerink, J.,J., Luettich, R.A., Muccio, J.C., 1994, Modelling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids, Tellus 46A, 178-199.

Xing, J., Davies, A.M., Jones, J.E., 2012, Influence of sea surface wind wave turbulence upon wind-induced circulation, tide-surge interaction and bed stress, 62, 1017-1042

1. Figure captions

Figure 1. Bathymetry of the Pertuis Charentais and location of tidal stations used for model calibration. The tidal stations: SAB = Sables d'Olonne, BAL = Baleineaux, PAL = La Pallice, AIX = Aix island, COT = La Cotiniere, CHA = Chapus

Figure 2. (a) Finite element grid used for calculations; (b) –(c) insets showing the refined grid in the Marennes-Oleron Bay

Figure 3. Comparison between observed and modeled amplitudes (a,c) and phases (b,d) of M2 (a,b) and M4 (c,d) at tidal stations shown in fig.1. The predicted values were obtained from the model with spatially uniform Chezy coefficient set consecutively to 50, 75 or 100 $\text{m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$.

Figure 4. The observed (green) and modeled locations of waterline at (a) 10:43, May 5, 2001; (b) 11:24, July 14, 1994; (c) 10:45, July 21, 2000. The modeled waterlines were computed with the spatially uniform Chezy coefficient set to 50, 75 or 100 $\text{m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$. The insets show the tidal curve at La Pallice (B in fig.1) with a blue point to mark sea level height at the image acquisition time.

Figure 5. As Fig.4 but location of the modeled waterlines correspond to 5, 10 or 25 min later than the time at which the satellite image were acquired

Figure 6. A two-zone parameterization of the Chezy coefficient: turquoise - tidal mudflats, dark blue - the rest of the basin.

Figure 7. As in fig. 4 but the observed waterlines are overlaid by the waterlines predicted by the frictional contrast model: $C = 75 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ on tidal flats and $C = 100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ in the rest of the model domain.

Figure 8. As fig.3 but the observed amplitudes and phases are compared to predictions of the model with spatially uniform Chezy coefficient equal to 50 and 100 $\text{m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ and to the model with frictional contrast: $C = 100 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ on the tidal flats and $C = 75 \text{ m}^{0.5}\text{sec}^{-1}$ in the rest of the model domain.

Résumé

Les Pertuis Charentais sont un site d'écosystèmes interconnectés où les courants marins jouent un rôle déterminant. Un modèle de marée à haute résolution a été développé au cours de cette thèse pour comprendre et cartographier les traits principaux de la circulation hydrodynamique dans les Pertuis. Deux axes sont ainsi mis en avant dans cette l'étude. D'abord, un nouveau modèle de marées dans les Pertuis Charentais a été construit et validé à partir de différentes sources : données marégraphiques, données de courantomètres ADCP et images satellitaires. Une nouvelle approche de calibration de modèle de marée a été développée, basée sur la comparaison de la position de la ligne d'eau, frontière entre l'eau et la terre, avec celle prédite par le modèle. Puis dans un second temps, le transport et les agrégations en « bloom » de populations de méduses *Rhizostoma*, dont les proliférations et les échouages sont à l'origine de problèmes socio-économiques, ont été simulés numériquement. Des observations *in situ* ont permis de paramétrer le comportement de nage des méduses dans le modèle. Deux types de comportements des méduses, actif et passif ont été simulés. Les courants de marées en présence des forçages-type météorologiques ont été pris en compte. Les résultats indiquent que le comportement individuel de nage des méduses pourrait être une réponse adaptative aux facteurs abiotiques qui menacent la continuité de leur espèce mais que les courants marins restent la cause première de la formation des blooms.

Abstract

The Pertuis Charentais are an interconnected ecosystems site where ocean currents play a key role. A high resolution tidal model was developed in this thesis in order to understand the main features of the hydrodynamic flows inside the Pertuis. Two topics were put forward in this study. First, a new tide model for the Pertuis Charentais was build up and validated by using different datasets: tide gauge records, measurements of currents by ADCP and satellite images. A new approach to model calibration was developed by comparing the observed position of the waterline, the boundary between land and water, with that predicted by the model. Secondly, the transport and bloom-like aggregation of the *Rhizostoma* jellyfish populations were simulated numerically. The jellyfish proliferation and stranding are a source of socio-economic problems. Two types of jellyfish behavior, active and passive were simulated. The tidal currents and typical meteorological forcing were taken into account. The results show that the individual behavior of swimming jellyfish is an adaptive response to abiotic factors for jellyfish survival.

Keyword: Jellyfish bloom, hydrodynamic transport, Pertuis Charentais, sea bottom friction, tide model, waterline, tidal flats